

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

OVĚŘENÍ VYUŽITELNOSTI ULTRAZVUKOVÉ IMPULSOVÉ METODY PRO HODNOCENÍ MRAZUVZDORNOSTI BETONOVÝCH CIHEL

VERIFICATION OF THE USABILITY ULTRASONIC PULSE METHOD FOR THE
ASSESSING OF FROST RESISTANCE OF CONCRETE BRICKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jana Kašparová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ BROŽOVSKÝ, CSc.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jana Kašparová
Název	Ověření využitelnosti ultrazvukové impulsové metody pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Büyükoztürk, O., Taşdemir, M.A. : Nondestructive Testing of Materials and Structures, Springer, 2011
Malhotra, V. N., and Carino, N. J. Handbook on nondestructive testing of concrete, 2nd edition. – CRC Press, USA, 2004

J. Obraz: Zkoušení materiálů ultrazvukem, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989
Martinček, G.: Nedeštruktívne dynamické metódy skúšania stavebných materiálov a konštrukcií, Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1962

Príslušné technické normy.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Pro hodnocení mrazuvzdornosti některých materiálů a výrobků jsou kromě zkoušek pevností využívány i dynamické nedeštruktivní metody zkoušení.

Cílem práce je ověřit reálnost využití ultrazvukové impulsové metody pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel.

Pro naplnění zadání práce je třeba v teoretické části:

Uvést základní charakteristiku vibrolisovaného betonu.

Popis působení mrazu a rozmrazování na betonu.

Uvést základní normové požadavky na betonové zdící prvky.

Uvést zkušební postupy pro zkoušení mrazuvzdornosti kodifikované v technických normách. Uvést nedeštruktivní metody pro hodnocení mrazuvzdornosti - postupy kodifikované v technických normách.

Popsat princip měření a postup vyhodnocení při zkoušení ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodou.

Popsat metodiku zkoušení a vyhodnocení výsledků zkoušek mrazuvzdornosti a měření ultrazvukovou impulsovou metodou.

Pro experimentální práce budou použity betonové cihly formátu 240 x 115 x 70mm. V experimentální části provést nedeštruktivní a deštruktivní zkoušky na srovnávacích vzorcích a na vzorcích po zkoušce mrazuvzdornosti. Zkoušky budou prováděny po 25 – 50 – 75 – 100 – 125 a 150 zmrazovacích cyklech.

Provést zhodnocení a analýzu dosažených výsledků a provést z hodnocení využitelnosti ultrazvukové impulsové metody pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel.

Rozsah práce cca 40 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.

Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá ověřením využitelnosti ultrazvukové impulsové metody pro stanovení mrazuvzdornosti betonu.

V teoretické části je pojednáno o základních charakteristikách vibrolisovaného betonu, popisu působení mrazu a rozmrazování na beton a další faktory ovlivňující mrazuvzdornost betonu. Následně jsou sumarizovány normové požadavky na betonové zdící prvky, zkušební postupy pro zkoušení mrazuvzdornosti nedestruktivními i destruktivními metodami betonu a dalších stavebních materiálů a jejich systémy vyhodnocování.

Druhá část bakalářské práce je věnována analýze a vyhodnocení výsledků a souvislostí experimentálních prací, ve kterých byla provedena zkouška mrazuvzdornosti betonových cihel cyklickým zmrazováním, a jejich zkoušení nedestruktivní ultrazvukovou impulsovou metodou a zároveň destruktivním způsobem.

Klíčová slova

mrazuvzdornost, ultrazvuková impulsová metoda, nedestruktivní metody, destruktivní metody, rezonanční metoda, betonové cihly

Abstract

Purpose of Bachelor thesis is to verify use of the ultrasonic impulsive method to determine frost resistance of the concrete.

Theoretical part discusses about basic characteristic of a vibropressed concrete, description of a causes of frost and defrosting on the concrete. As well further factor simple menting frost resistance are reviewed. Summary is followed with standard requirements for wall concrete elements, trial procedures for non destructive and destructive methods for concrete and other construction materials and their evaluation systems.

Second part of Bachelor thesis is dedicated to analyse and evaluate results and relationship of trials used for testing of a concrete brick in frost resistance with use of cyclic freezing and use of a trial non destructive ultrasonic impulsive method as well destructive mode.

Keywords

frost resistance, ultrasonic pulse method, nondestructive method, destructive method, resonant frequency method, concrete bricks

Bibliografická citace VŠKP

Jana Kašparová *Ověření využitelnosti ultrazvukové impulsové metody pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel*. Brno, 2017. 76 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2017

Jana Kašparová

Poděkování

V první řadě bych ráda poděkovala vedoucímu své bakalářské práce, panu doc. Ing. Jiřímu Brožovskému, CSc., za doporučení literatury, pomoc při provádění experimentálních prací, odborné vedení a čas, který mi věnoval po celou dobu zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat svému příteli a rodině, kteří mě významně podporovali po celou dobu studia na této škole.

Úvod.....	10
1 Cíle práce	11
2 Základní charakteristika vibrolisovaného betonu	12
3 Mrazuvzdornost betonu	13
4 Požadavky na betonové zdící prvky.....	15
4.1 Požadavky na betonové tvárnice.....	15
5 Zkoušky mrazuvzdornosti a využití dynamických nedestruktivních metod pro hodnocení mrazuvzdornosti stavebních materiálů.....	17
5.1 Zkušební postupy pro zkoušení mrazuvzdornosti kodifikované v technických normách.....	17
5.1.1 Podstata metod pro zkoušení mrazuvzdornosti.....	17
5.1.2 ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu	18
5.1.3 ČSN EN 15304 Stanovení odolnosti autoklávovaného pórobetonu proti zmrazování a rozmrazování.....	19
5.1.4 ČSN EN 772-18 Zkušební metody pro zdící prvky – Část 18: Stanovení mrazuvzdornosti vápenopískových zdících prvků.....	20
5.1.5 ČSN 72 2601/Z3 Skúšanie tehliarskych výrobkov – Spoločné ustanovenia	21
5.1.6 ČSNP CEN/TS 772-22 Zkušební metody pro zdící prvky – Část 22: Stanovení mrazuvzdornosti pálených zdících prvků	21
5.1.7 ČSN EN 12371 Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení mrazuvzdornosti.....	23
5.1.8 ČSN 72 2452 Zkouška mrazuvzdornosti malty	24
5.1.9 Zhodnocení	24
5.2 Dynamické nedestruktivní metody	25
5.2.1 Podstata ultrazvukové impulsové metody.....	26
5.2.2 Podstata rezonanční metody.....	26
5.3. Nedestruktivní metody pro hodnocení mrazuvzdornosti - postupy kodifikované v technických normách.....	27
5.3.1 ČSN EN 12504-4 Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu.....	27
5.3.2 ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu.....	29
5.3.3 ČSN 73 1380 Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – Porušení vnitřní struktury	30

5.3.4	ČSN 73 1372 Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu.....	32
5.3.5	ČSN EN 14146 Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení dynamického modulu pružnosti (pomocí základní rezonanční frekvence).....	35
5.3.6	Kritéria pro hodnocení mrazuvzdornosti s využitím nedestruktivních metod	37
5.3.7	Zhodnocení	37
6	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
6.1	Metodika měření a vyhodnocení výsledků měření ultrazvukovou impulzovou metodou	39
6.1.1	Zkušební vzorky.....	39
6.1.2	Rozdělení a příprava vzorků pro zkoušky.....	40
6.1.3	Zkouška mrazuvzdornosti.....	40
6.1.4	Měření ultrazvukovou impulzovou metodou.....	43
6.1.5	Vyhodnocení výsledků měření ultrazvukovou impulzovou metodou a zkoušky pevnosti v tlaku	44
6.2	Výsledky měření a zkoušek	47
6.3	Diskuze k výsledkům experimentálních prací	54
6.3.1	Relativní dynamické moduly pružnosti a změny rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a dynamických modulů pružnosti v tlaku a tahu v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů.....	54
6.3.2	Vyhodnocení výsledků měření ultrazvukovou impulzovou metodou a součinitelů mrazuvzdornosti.....	57
6.3.3	Zhodnocení výsledků experimentálních prací	59
6.3.4	Dosažené poznatky	65
	Závěr	67
	Seznam použité literatury.....	69
	Seznam použitých obrázků.....	71
	Seznam tabulek	71
	Seznam grafů.....	73
	Použité symboly a zkratky	73

Úvod

Ve stavebnictví jsou nedestruktivní metody primárně využívány pro zkoušení betonu v konstrukcích. Mezi nejrozšířenější metody patří metoda odrazového tvrdoměru a dále dynamické metody, především ultrazvuková impulsová. Postupy zkoušení těmito metodami jsou kodifikovány v příslušných českých technických normách, jak převzatých evropských, tak i v národních.

Výhody nedestruktivních zkoušek spočívají v možnosti mnohanásobného opakování zkoušky na jednom vzorku, z nichž je možné získat velké množství informací o jakosti betonu v konstrukci. Opakovatelnost zkoušení umožňuje zjišťovat informace o daných vzorcích v různých obdobích tvrdnutí betonu. Výhodami jsou též v rychlost vykonání zkoušek a dostatečná přesnost měření charakteristik nedestruktivních metod.

Metoda odrazového tvrdoměru (tvrdoměry systému Schmidt) je využívána pro zjišťování pevnosti v tlaku betonu zabudovaného v konstrukci.

Dynamické metody využívané pro zkoušení betonu jsou ultrazvuková impulsová a rezonanční metoda.

Ultrazvukovou impulsovou metodou lze za přesně stanovených podmínek a při existenci potřebného kalibračního vztahu zjišťovat pevnost betonu v tlaku. Tato metoda nachází širší uplatnění při zjišťování dynamického modulu pružnosti betonu, defektů, změn v jeho struktuře a při hodnocení jeho stejnorodosti – lze hodnotit jak beton v konstrukci, tak i zkušební tělesa vyrobená z betonu.

Rezananční metoda je využitelná pro měření na zkušebních tělesech a slouží primárně pro zjišťování dynamických modulů pružnosti a dynamického Poissonova čísla.

Obě uvedené dynamické metody jsou využívány i při hodnocení mrazuvzdornosti některých stavebních materiálů (beton, stavební kámen) nebo pro hodnocení odolnosti betonu proti agresivním médiím. Postupy měření a vyhodnocení jsou uvedeny v příslušných českých technických normách – pro betony v ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu, ČSN 73 1380 a pro stavební kámen v ČSN EN 14146.

Bakalářská práce se zabývá využitím ultrazvukové impulsové metody pro zkoušení a hodnocení mrazuvzdornosti plných betonových cihel s využitím postupů uvedených v normách ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu a ČSN 73 1380 Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřní struktury, tj. z hodnocení změn parametrů nedestruktivního zkoušení (doby průchodu ultrazvukového impulsu, rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu).

1 Cíle práce

Cílem práce je ověření využitelnosti ultrazvukové impulzové metody pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel, tj. změn charakteristik z měření ultrazvukovou impulsovou metodou (doby průchodu ultrazvukového impulsu materiálem, rychlosti šíření ultrazvukového impulsu, dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu) v důsledku změn ve vnitřní struktuře cihel od střídavého zmrazování a rozmrazování.

Teoretická část této práce pojednává o následujících tématech:

- Základní charakteristika vibrolisovaného betonu.
- Popis působení mrazu a rozmrazování na beton.
- Základní normové požadavky na betonové zdící prvky.
- Zkušební postupy pro zkoušení mrazuvzdornosti kodifikované v technických normách.
- Nedestruktivní metody pro hodnocení mrazuvzdornosti - postupy kodifikované v technických normách.
- Princip měření a postup vyhodnocení při zkoušení ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodou.
- Metodika zkoušení a vyhodnocení výsledků zkoušek mrazuvzdornosti a měření ultrazvukovou impulsovou metodou.

Náplní experimentální části jsou následující témata:

- Zkoušku mrazuvzdornosti betonových cihel.
- Provedení nedestruktivních a destruktivních zkoušek na srovnávacích vzorcích a na vzorcích po zkoušce mrazuvzdornosti. Tyto zkoušky jsou prováděny po 25, 50, 75, 100, 125 a 150 zmrazovacích cyklech.
- Zhodnocení a analýza dosažených výsledků experimentální práce.
- Zhodnocení využitelnosti ultrazvukové impulsové metody pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel.

Výstupem práce je posouzení využitelnosti ultrazvukové impulsové metody pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel.

2 Základní charakteristika vibrolisovaného betonu

Základní rozdíl mezi klasickým a vibrolisovaným betonem spočívá ve způsobu zhutňování.

Vibrolisování je způsob zhutňování, při kterém je beton vibrován za současného působení dolisovacího přtlaku. Kombinací obou způsobů zhutňování dochází k odstranění většiny nevýhod s sebou nesoucích, pokud jsou způsoby používány samostatně.

Při zhutňování betonu pouze vibrací, dochází také ke vzniku tzv. samozhutňovacího tlaku, který je po výšce výrobku rozdílný a na jeho povrchu je téměř roven nule. Naopak zhutňováním betonu pouze dolisovacím přtlakem je dosaženo největšího zhutňovacího efektu na povrchu výrobku. [6]

Za jednoznačně stanovených parametrů dochází při využití obou těchto metod ke vzniku rovnoměrného zhutňovacího efektu v celém objemu výrobku, se kterým lze ihned po vyrobení dále manipulovat. [6]

K efektivnímu využití výše popsaného technologického principu zhutňování betonu a následně okamžité manipulaci výrobku po jeho výrobě, je důležitým kritériem dodržet vhodnou konzistenci směsi. Pro výrobu vibrolisovaných dlažebních prvků se používají velmi „suché“ směsi s vodním součinitelem pohybujícím se v intervalu 0,30 až 0,36. [3]

Napříč velmi efektivnímu způsobu hutnění se používají speciální přísady umožňující lepší a rychlejší hutnění bez dalšího snižování vodního součinitele.

Dlažební prvky jsou vyrobeny ze dvou různých vrstev, lišících se svými parametry dle účelu jejich funkce. Užité, zejména pevnostní požadavky musí splňovat spodní neboli jádrová vrstva, jež tvoří 90 % objemu dlažebního prvku. Musí obsahovat kamenivo max. frakce 11 mm. [5]

Odolnost vůči agresivním médiím (chemické rozmrazovací látky) musí vykazovat horní neboli nášlapná vrstva, na níž jsou současně kladeny i požadavky na vzhled – struktura povrchu, probarvení atd. Z důvodu tohoto požadavku je pro výrobu nášlapné vrstvy nutno použít drobné monofrakční kamenivo (např. křemičitý písek) do velikosti zrna 2 mm. [3]

Dodržení výše popsaných požadavků pro výrobu vibrolisovaného prvku, jako je složení betonové směsi za použití příslušných metod hutnění, předurčuje prvkům velmi dobré parametry, které musí splňovat s ohledem na jejich expozici nepříznivým podmínkám, jako jsou mechanická, chemická a klimatická namáhání.

3 Mrazuvzdornost betonu

Mrazuvzdornost betonu je důležitou vlastností betonů vystavených střídavým účinkům tepla a mrazu za přítomnosti vlhkosti a vody, případně i rozmrazovacích solí. Je to schopnost betonu ve vodou nasyceném stavu odolávat opakovanému zmrazování a rozmrazování, přičemž není závislé na přítomnosti ocelové výztuže. Jedná se o čistou degradaci povrchu nebo struktury betonu.

Mrazuvzdornost betonu je přímo ovlivněna množstvím pórů a kapilár ve struktuře betonu. V těchto dutinách dochází ke hromadění vody a při působení mrazu k jejímu následnému zmrznutí a zvětšení objemu. Tyto změny mohou způsobit porušení struktury betonu.[5]

Chemicky vázaná (krystalová) voda v materiálu nikdy v led nepřechází. Naopak gelová voda přechází v led až při velmi nízkých teplotách, zcela zmrzne při $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$. V kapilárách voda přechází v led nejdříve při teplotách asi $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, neboť v kapilárách se nachází roztok. Teplota tvorby ledu závisí na velikosti kapilár. Snižováním teploty se podle velikosti kapilár vytváří ledová tříšť, která se z větších kapilár tlačí do kapilár menších. Postupně se zvětšuje objem, neboť led má objem o $1/11$ (9 %) větší než voda. Vznikající krystalický tlak ledu překračuje až 200 MPa . Led nejdříve vzniká na povrchu betonu a podle rychlosti ochlazování se tlačí do středu betonu a způsobuje objemový nárůst. Když led roztaje, zůstává až $1/3$ celkového původního objemového nárůstu. [4]

Dalším důležitým kritériem ovlivňující mrazuvzdornost je obsah a rozložení pórů a uzavřených mikropórů. Póry (kulové i kapilární) jsou velikosti průměru větší jak $0,30\text{ mm}$ a pro trvanlivost jsou nebezpečné. Naopak mikropóry, kterými označujeme póry s velikostí průměru od $0,05$ do $0,2\text{ mm}$, jež nejsou vzájemně propojeny a jsou rovnoměrně rozprostřeny v cementovém kameni ve vzdálenosti do $0,20\text{ mm}$, naopak mrazuvzdornost zlepšují. Mikropóry přerušují kapiláry, čímž brání pronikání vody a vytvářejí tak podmínky pro snižování hydrostatického tlaku v betonu. [5]

Mrazuvzdornost můžeme tedy zvýšit výrobou hutných betonů bez trhlin, dutin a pórů, anebo vytvořením umělých mikropórů jemně rozptýlených v betonu za použití provzdušňujících přísad. Další možností je pak výroba betonu s vodním součinitelem nižším než $0,4$, u kterých bylo vyzkoušeno, že odolávají mrazu dobře, z důvodu jejich obsahu a rozložení mikropórů, které je téměř srovnatelné se strukturou provzdušněných betonů. [24]

Dle Erlin/Matherova efektu je degradace betonu způsobena napětím v betonu, vyvolaným rozpínajícím se ledem z důvodu teplotní roztažnosti při ohřívání ledu. Dle této teorie tedy k nejintenzivnější degradaci dochází při oteplení při teplotách těsně pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teorií porušení mrazem je ovšem více. Výsledkem této degradace je povrch, ze kterého odpadávají rozrušené kousky betonu, případně narušená struktura betonu způsobující pokles

pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v tlaku nebo dynamických modulů pružnosti v tahu a tlaku. [24]

Ke specifikaci betonu se přistupuje prioritně dle vlivu prostředí a dle životnosti konstrukce v daném prostředí. Tento vliv prostředí a požadovaná životnost konstrukce v něm teprve udává minimální kvalitativní nebo kvantitativní parametry betonu. Dle vlivu prostředí zařazujeme betonové konstrukce a prvky, které jsou vystavené působení mrazu a rozmrazování (mrazové cykly) s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich, do třídy prostředí XF - Střídavé působení mrazu a rozmrazování. Tato třída obsahuje ještě následující dílčí členění dle rozsahu nasycení vodou a působení rozmrazovacích prostředků:

- XF1 - pro prostředí mírného nasycení vodou bez rozmrazovacích prostředků,
- XF2 - pro prostředí mírného nasycení vodou s rozmrazovacími prostředky,
- XF3 - pro prostředí vysokého nasycení vodou bez rozmrazovacích prostředků,
- XF4 - pro prostředí vysokého nasycení vodou s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou.

Zjevné mrazové porušení betonu doprovázejí vždy neviditelné změny, jako jsou: ztráta pevnosti v tlaku, ztráta pevnosti v tahu za ohybu, dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku, ztráta nepropustnosti a zvětšení objemu. Obvykle se uplatní tyto změny dříve než poruchy viditelné, čili zkoušky, jimiž se tyto skryté změny zjišťují a měří, jsou přísnější a přesnější, ale i pohotovější. Velmi průkazným způsobem kontroly následků mrazu je měření proměny dynamického modulu pružnosti v tlaku a v tahu E_{cu} . Změna dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku E_{cu} se vhodně stanovuje např. z frekvence vlastního kmitání nebo akusticky z rychlosti šíření zvuku. [24]

Alternativním způsobem kontroly následků mrazu je měření změn nasákavosti a propustnosti. [24]

4 Požadavky na betonové zdící prvky

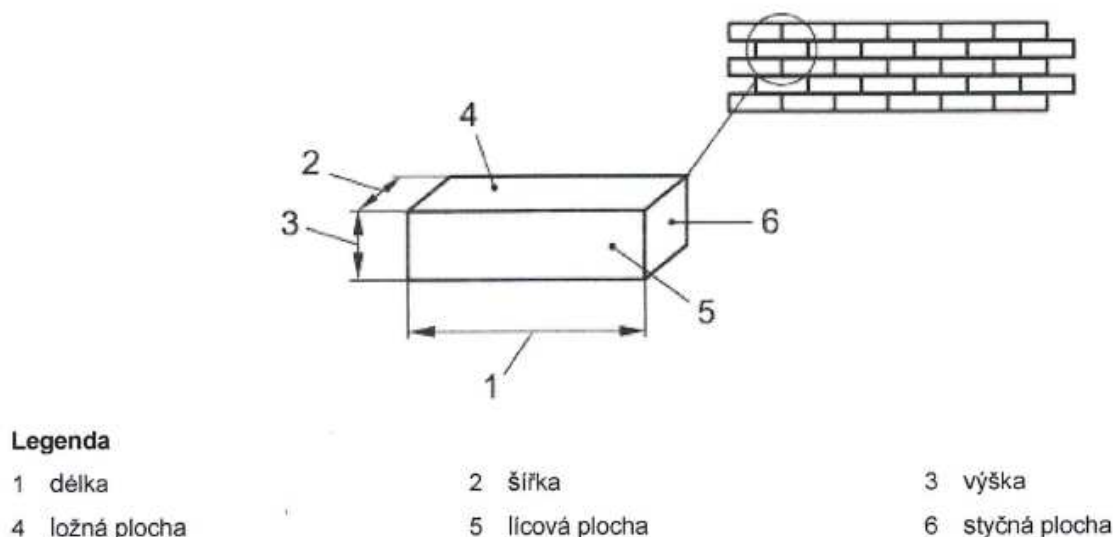
Normové požadavky na betonové zdící prvky jsou stanoveny v ČSN EN 771-3 ed. 2 Specifikace zdících prvků – Část 3: Betonové tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem. Předmětem této normy je stanovení charakteristik betonových tvárnic s hutným nebo pórovitým kamenivem, nebo se směsí obou těchto kameniv, dále funkční požadavky na vlastnosti těchto prvků, určených pro zhotovování zdiva obvyčejného omítaného, neomítaného zdiva vnitřních nebo vnějších stěn nosných a nenosných, zděných konstrukcí v pozemních a inženýrských stavbách. [9]

4.1 Požadavky na betonové tvárnice

Základní požadavky na betonové tvárnice dle ČSN EN 771-3 jsou uvedeny v tabulce 1 a tabulce 2.

Tabulka 1 – Požadavky na rozměry, tolerance, tvar a vzhled prvků [9]

Rozměry a tolerance				
Charakteristika	Požadavek			
Rozměry	Deklarováno v pořadí: délka l , šířka s a výška h (viz obrázek 1).			
Kategorie tolerancí	D1	D2	D3	D4
délka l [mm]	+3 -5	+1 -3	+1 -3	+1 -3
šířka s [mm]	+3 -5	+1 -3	+1 -3	+1 -3
výška h [mm]	+3 -5	±2	±1,5	±1,0
Rovinnost ložných ploch	Pokud zdící prvek spadá do kategorie D4, musí být deklarována největší odchylka ložných ploch od rovinnosti těchto ploch.			
Rovnoběžnost rovin ložných ploch	Pokud zdící prvek spadá do kategorie D4, musí být deklarována největší odchylka ložných ploch od rovnoběžnosti rovin těchto ploch.			
Tvar, uspořádání a vzhled				
Charakteristika	Požadavek			
Tvar a uspořádání	Dle způsobu použití musí být deklarován tvar, uspořádání prvků a požadavky pro tvárnice pravidelného tvaru.			
Rovinnost povrchu lícových tvárnic	Odchylka povrchu od roviny musí být $\leq(0,1\sqrt{l_d})$ mm nebo 2 mm, kde l_d je délka diagonály deklarovaného povrchu tvárnice založená na aktuálních rozměrech tvárnice.			
Vzhled povrchu lícových tvárnic	Porovnáním se schválenými vzorky ze vzdálenosti 3 m za normálního denního osvětlení.			



Obrázek 1 – Rozměry a povrchové plochy zdícího prvku [9]

Tabulka 2 - Přehled zkoušek a příslušná ustanovení [9]

Charakteristika	Požadavek – deklarované hodnoty
Objemová hmotnost v suchém stavu	Dle použití se musí deklarovat v kg/m^3 , od deklarované hodnoty musí být odchylka $\pm 10\%$.
Pevnost v tlaku	Deklarovaná (charakteristická nebo průměrná) hodnota v MPa, s údajem o směru zatížení a kategorie tvárnice.
Pevnost v tahu za ohybu	Pokud je šířka tvárnice menší než 100 mm a poměr délky k šířce tvárnice je větší než 10, může se deklarovat namísto pevnosti v tlaku.
Rozměrová stabilita – vlhkostní přetvoření	Uvádí se u prvků pro použití v nosných konstrukcích jako vlhkostní přetvoření v mm/m.
Přídržnost ve smyku	Uvádí se u prvků pro použití v nosných konstrukcích jako počáteční pevnost ve smyku v MPa.
Přídržnost za ohybu	Uvádí se u prvků pro použití v nosných konstrukcích, dle požadavku použité metody.
Reakce na oheň	Deklarovaná reakce na oheň, třída A1 až F.
Mrazuvzdornost, trvanlivost	Deklarovaná hodnota nebo deklarovaný údaj „Neponechat nechráněné“.
Nasákavost¹⁾	Hodnota v g/m^2 nebo deklarovaný údaj „Neponechat nechráněné“.
Propustnost vodních par²⁾	Deklarovaná hodnota faktoru difúzního odporu.
Tepelně-technické vlastnosti, tepelný odpor	Tepelná vodivost $\lambda_{10,\text{dry},\text{unit}}$ ve $\text{W/m}\cdot\text{K}$ a použitý postup vyhodnocení nebo objemová hmotnost, tvar a uspořádání.
¹⁾ U prvků určených k použití v izolačních vrstvách proti vlhkosti, nebo ve vnějších konstrukcích s neomítaným povrchem.	
²⁾ U prvků určených k použití ve vnějších neomítaných konstrukcích.	

5 Zkoušky mrazuvzdornosti a využití dynamických nedestruktivních metod pro hodnocení mrazuvzdornosti stavebních materiálů

5.1 Zkušební postupy pro zkoušení mrazuvzdornosti kodifikované v technických normách

Zkoušení mrazuvzdornosti vybraných stavebních materiálů a výrobků jako jsou: beton, vápenopískové zdící prvky, cihlářské výrobky, autoklávovaný pórobeton, pálené zdící prvky, přírodní kámen a malta se provádí dle stanovených zkušebních postupů uvedených v příslušných technických normách, konkrétně:

- ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu,
- ČSN EN 15304 Stanovení odolnosti autoklávovaného pórobetonu proti zmrazování a rozmrazování,
- ČSN EN 772-18 Zkušební metody pro zdící prvky – Část 18: Stanovení mrazuvzdornosti vápenopískových zdících prvků,
- ČSN 72 2601/Z3 Skúšanie tehliarskych výrobkov – Spoločné ustanovenia,
- ČSN P CEN /TS 772-22 Zkušební metody pro zdící prvky – Část 22: Stanovení mrazuvzdornosti pálených zdících prvků,
- ČSN EN 12371 Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení mrazuvzdornosti,
- ČSN 72 2452 Zkouška mrazuvzdornosti malty.

V následujících podkapitolách jsou uvedeny požadavky na zkušební tělesa, zkušební postupy a parametry pro vyhodnocení mrazuvzdornosti dle výše uvedených norem.

5.1.1 Podstata metod pro zkoušení mrazuvzdornosti

Podstatou uvedených zkoušek (vyjma ČSN P CEN /TS 772-22 Zkušební metody pro zdící prvky – Část 22: Stanovení mrazuvzdornosti pálených zdících prvků, viz kapitola 6.1.5) je střídavé zmrazování a rozmrazování vodou nasycených zkušebních těles počtem cyklů, který je podle požadavku na stupeň mrazuvzdornosti materiálu dán příslušnými normami, předpisy nebo projektem a míry porušení vzorků. Na základě těchto základních zkoušek je možno odvodit kritéria pro určení mrazuvzdornosti příslušného materiálu při menším počtu zmrazovacích cyklů, jsou-li změny struktury betonu sledovány nedestruktivními dynamickými zkouškami.

5.1.2 ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu

Norma uvádí postup pro zkoušení mrazuvzdornosti na zkušebních tělesech betonů hutných, z hutného i pórovitého kameniva. [10]

V tabulce 3 jsou uvedeny základní požadavky na zkoušení mrazuvzdornosti betonu, včetně jejího vyhodnocení.

Tabulka 3 – Postup zkoušení a vyhodnocení dle ČSN 73 1322 [10]

ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu	
Zkušební postup	
Zkušební tělesa	<ul style="list-style-type: none"> - nevyztužené trávce čtvercového průřezu, které se používají pro zkoušku pevnosti v tahu ohybem podle ČSN EN 12390-5, - zkušební tělesa výhradně celá a neporušená, za neporušená tělesa se považují taková, jejichž žádná průřezová plocha není oslabena o více než 1 %, - před nasycením těles vodou a jejich zmrazováním se zjistí jejich rozměry, hmotnosti a vypočítá se jejich objemová hmotnost dle ČSN EN 12390-7,
Počet zkušebních těles	<ul style="list-style-type: none"> - určí se s ohledem na počet zmrazovacích cyklů a počet mezilehlých kontrol, - pro každou zmrazovací etapu je třeba zhotovit 1 sadu trámců (nejméně 3 ks) zmrazovaných, pokud se mezilehlá kontrola jakosti betonu nekoná nedestruktivně, a 1 sadu trámců nerozmrazovaných pro porovnávací účely,
Zkušební zařízení	<ul style="list-style-type: none"> - mrazicí prostor s regulovatelnou teplotou do -20 °C až -23 °C takových rozměrů, aby zkušební tělesa vyplňovala nejvýše třetinu jeho objemu, - vodní lázeň pro rozmrazování zkušebních těles s automatickou regulací teploty v rozmezí +15 °C až +22 °C, - v případě konání nedestruktivních mezilehlých kontrol rezonanční nebo ultrazvukový přístroj,
Cykly zmrazování-rozmrazování	<ul style="list-style-type: none"> - 4 hodiny zmrazování a 2 hodiny rozmrazování, - při zmrazování se zkušební tělesa ukládají do prostoru, který musí mít předem požadovanou teplotu, - při rozmrazování se zkušební tělesa ukládají do vody +20 °C teplé, - 1 etapa obsahuje požadovaný počet zmrazovacích cyklů, obvykle 25, 50, 75, 100, 125, 150 cyklů.
Vyhodnocení zkoušky	
<p>Součinitel mrazuvzdornosti, tj. poměr hodnoty aritmetického průměru pevnosti zmrazovaných trámců v tahu za ohybu k hodnotě aritmetického průměru pevnosti porovnávacích trámců v tahu za ohybu.</p> <p>Beton je mrazuvzdorný na ten počet cyklů, při kterém součinitel mrazuvzdornosti není menší než 75 % nebo ukazatel nedestruktivní zkoušky dosáhl hodnoty určující mrazuvzdornost podle příslušných norem nebo předpisů.</p>	
Využití nedestruktivních metod zkoušení	
<p>Norma uvádí využití NDT metod, konkrétně ultrazvukového nebo rezonančního přístroje. Postup těmito metodami je podrobně uveden v kap. 5.3.2 a 5.3.4.</p>	

5.1.3 ČSN EN 15304 Stanovení odolnosti autoklávovaného pórobetonu proti zmrazování a rozmrazování

Norma popisuje metodu pro stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování autoklávovaného pórobetonu vyráběného podle ČSN EN 12602 Prefabrikované vyztužené prvky z autoklávovaného pórobetonu nebo ČSN EN 771-4 Specifikace zdicích prvků – Část 4: Pórobetonové tvárnice.

V tabulce 4 jsou uvedeny základní požadavky na zkoušení odolnosti autoklávovaného pórobetonu proti zmrazování a rozmrazování, vč. jejího vyhodnocení. [11]

Tabulka 4 - Postup zkoušení a vyhodnocení dle ČSN EN 15304 [11]

ČSN EN 15304	
Stanovení odolnosti autoklávovaného pórobetonu proti zmrazování a rozmrazování	
Zkušební postup	
Zkušební tělesa	<ul style="list-style-type: none"> - tělesa tvaru krychle o hraně (100 ± 2) mm vyřezaná z výrobků vyráběných z běžné výroby, - změření délky, výšky, šířky s přesností na 0,1 mm a výpočet jejich objemu, - ponoření ve vodě po dobu 48 h při teplotě (20 ± 2) °C, po dobu 24 h ponořena do poloviny jejich výšky (50 mm) a po dobu 24 h zcela ponořená, následně jejich vyjmutí z vody a uzavření v polyethylenových sáčkích po dobu 24 h,
Počet zkušebních těles	<ul style="list-style-type: none"> - 1 sada sestává ze 12 zkušebních těles: 6 hlavních a 6 porovnávacích zkušebních těles,
Cykly zmrazování-rozmrazování	<ul style="list-style-type: none"> - zmrazování na vzduchu při (-15 ± 2) °C, perioda začíná dobou, kdy je ve středu zkušebních těles dosaženo teploty (-15 ± 2) °C a musí trvat nejméně 8 h, - rozmrazování při teplotě vzduchu (20 ± 2) °C a relativní vlhkosti přes 95 %, perioda začíná dobou, kdy je ve středu zkušebních těles dosaženo teploty (20 ± 2) °C a musí trvat nejméně 8 h, - požadovaný počet cyklů a jakékoliv meze pro ztrátu hmotnosti a/nebo snížení pevnosti musí být uvedeny v národním aplikačním dokumentu.
Vyhodnocení zkoušky	
<p>Výpočet objemové hmotnosti v suchém stavu, obsahu vlhkosti, ztráty hmotnosti. Pokud je požadována ztráta pevnosti v tlaku, zkoušíme tělesa buď v suchém stavu, nebo v nasáklém stavu a následně se vypočítá jejich ztráta pevnosti v tlaku.</p> <p>Po 15 zmrazovacích cyklech a během dokončení zkoušky nesmí být zaznamenáno žádné viditelné poškození na hlavních zkušebních tělesech.</p>	
Využití nedestruktivních metod zkoušení	
Norma využití NDT metod neuvádí.	

5.1.4 ČSN EN 772-18 Zkušební metody pro zdící prvky – Část 18: Stanovení mrazuvzdornosti vápenopískových zdících prvků

V této evropské normě je uveden postup stanovení mrazuvzdornosti a hodnocení vápenopískových zdících prvků. [12]

Tabulka 5 - Postup zkoušení a vyhodnocení dle ČSN EN 772-18 [12]

ČSN EN 772-18 Zkušební metody pro zdící prvky – Část 18: Stanovení mrazuvzdornosti vápenopískových zdících prvků	
Zkušební postup	
Zkušební tělesa a jejich počet	<ul style="list-style-type: none"> - pokud je délka zdících prvků ≥ 500 mm a/nebo výška ≥ 300 mm, odeberou se tři zdící prvky, z nichž se vyříznou zkušební tělesa, - pokud je délka zdících prvků < 500 mm a výška < 300 mm, podrobí se zkoušce nejméně šest celých zdících prvků nebo šest vyříznutých těles,
Zmrazovací zařízení	<ul style="list-style-type: none"> - mrazicí prostor musí být min. pětikrát větší než objem zkušebních těles, - rovnoměrná teplota vzduchu by měla být -15 °C v rozmezí 3 až 5 h,
Cykly zmrazování-rozmrazování	<ul style="list-style-type: none"> - teplota během zmrazování v rozsahu 3 až 5 h musí být -15 °C, která se udržuje min. po dobu dalších 2 h, - rozmrazování ve vodě teploty (20 ± 5) °C po dobu min. 1 h, - počet cyklů odpovídá třídě mrazuvzdornosti specifikované výrobcem.
Vyhodnocení zkoušky	
<p>Zaznamenávají se všechny viditelné změny zkušebních těles. Pokud došlo k porušení některého ze vzorků nebo všech, vypočítá se snížení pevnosti těles v tlaku (dle vztahu 1) v porovnání s odděleně uloženými tělesy, která nebyla podrobena zmrazovací zkoušce.</p> $R_c = \frac{f_n - f_f}{f_n} \cdot 100 [\%] \quad (1)$ <p>Pokud tělesa nevykazují žádné změny, za hodnotu R_c se může považovat bez vizuálního posouzení a výpočtu $R_c < 20$ %. V opačném případě musí být snížení pevnosti v tlaku zmrazovaných těles vůči porovnávacím tělesům menší než 20 %.</p>	
Využití nedestruktivních metod zkoušení	
Norma využití NDT metod neuvádí.	

5.1.5 ČSN 72 2601/Z3 Skúšanie tehliarskych výrobkov – Spoločné ustanovenia

Změna Z3 ČSN 72 2601 popisuje zmrazovací cyklus – zmrazení a po něm následující rozmrazení zkušební vzorku předepsaným způsobem. [13]

Tabulka 6 - Postup zkoušení a vyhodnocení dle ČSN 72 2601/Z3 [13]

ČSN 72 2601/Z3 Skúšanie tehliarskych výrobkov – Spoločné ustanovenia	
Zkušební postup	
Zkušební tělesa a jejich počet	- 5 zkušebních vzorků, zkušebním vzorkem se rozumí celý vzorek,
Cykly zmrazování-rozmrazování	- nasáknuté zkušební vzorky dle ČSN 72 2603 se vloží do prostoru s teplotou vzduchu $(-20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ na 16 h při udržení této teploty, - výrobky nemají vyplňovat více než $\frac{1}{2}$ mrazícího prostoru, - rozmrazování v nádobě naplněné vodou $(15 - 30) ^\circ\text{C}$ po dobu min. 2 h.
Vyhodnocení zkoušky	
Posouzení vzhledových změn, které nesmí být většího rozsahu. Průměrná pevnost nebo únosnost nepoklesla o více než 20 % oproti průměrné pevnosti nebo únosnosti na vzorcích nepodrobených zkoušce mrazuvzdornosti.	
Využití nedestruktivních metod zkoušení	
Norma využití NDT metod neuvádí.	

5.1.6 ČSNP CEN/TS 772-22 Zkušební metody pro zdící prvky – Část 22: Stanovení mrazuvzdornosti pálených zdících prvků

Tato technická norma určuje metodu stanovení mrazuvzdornosti pálených zdících prvků, kterou výrobce deklaruje jako splňující požadavky pro zdící prvky vhodné pro použití v nepříznivých podmínkách prostředí. [14]

Podstata metody

Pro zkoušku se zhotovuje zkušební panel složený z pálených zdících prvků, které byly ponořeny po předepsanou dobu ve vodě, a které jsou od sebe vzájemně odděleny pryžovým materiálem určeným pro výplň spár, nebo ze zdících prvků spojených rychle tvrdnoucí maltou, které se po dostatečném zatvrdnutí malty ponoří na předepsanou dobu do vody. Zkušební panel je následně po předepsanou dobu ochlazován tak, aby voda v blízkosti lícové plochy podléhala opakovanému zmrazování a rozmrazování. Vizualní posouzení poškození vzniklého působením zmrazování a rozmrazování se využije ke stanovení mrazuvzdornosti cihel. [14]

Tabulka 7 - Postup zkoušení a vyhodnocení dle ČSN P CEN/TS 772-22 [14]

ČSN P CEN/TS 772-22	
Zkušební metody pro zdící prvky – Část 22: Stanovení mrazuvzdornosti pálených zdících prvků	
Zkušební postup	
Zkušební tělesa a jejich počet	<ul style="list-style-type: none"> - dostatečné množství vzorků ke zhotovení zkušebního panelu s plochou lícové strany v rozmezí od 0,25 m² do 0,5 m², - vyplnění spár panelu pěnovou pryží nebo maltou, - všechny plochy panelu kromě lícové plochy, která bude podrobena zmrazování, musí být uzavřeny v přiléhavém opláštění z pěnového polystyrénu s $\rho \leq 50 \text{ kg/m}^3$.
Cykly zmrazování-rozmrazování	<ul style="list-style-type: none"> - vystavení působení 100 cyklů zmrazování-rozmrazování, - první úsek zmrazování musí trvat $6 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$, každý následující $120 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$ při teplotě vzduchu $(-15 \pm 3) ^\circ\text{C}$ po dobu 90-100 min tak, aby celková délka časových úseků byla $120 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$, - rozmrazování při teplotě vzduchu $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ po dobu $20 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$ včetně doby vzestupu teploty.
Vyhodnocení zkoušky	
<p>Stanovení počtu zdících prvků ve zkoušeném panelu, u kterých došlo k poškození typu č. 4 a výše (viz tabulka 4), mezi počátečním prozkoumáním, po prozkoumání v požadované době a po 100 cyklech.</p> <p>Pokud se neobjeví poškození typu 4 nebo vyšší u žádného ze zdících prvků, jsou zdící prvky považovány za vhodné k použití v nepříznivých podmínkách prostředí, kategorie F2.</p>	
Využití nedestruktivních metod zkoušení	
Norma využití NDT metod neuvádí.	

Tabulka 8 - Typy poškození pálených zdících prvků [14]

Popis poškození	Typ
Žádné	0
Vydrolení (např. cicvár)	1
* Vlasová trhлина $\leq 0,2 \text{ mm}$	2
* Okrajová trhлина	3
* Povrchová trhлина $> 0,2 \text{ mm}$	4
Průběžná trhлина	5
Štípání, olupování, odprýskávání	6
Lom	7
Odštípnutí okraje, rozlupování (lístkování)	8
* Pokud se vlasové trhliny, menší trhliny nebo povrchové trhliny objeví společně s rozlupováním a tato skutečnost může být potvrzena rozříznutím cihly, potom se poškození uvádí jako rozlupování (lístkování).	

5.1.7 ČSN EN 12371 Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení mrazuvzdornosti

Tato evropská norma popisuje postup zkoušení a vyhodnocení vlivu zmrazovacích-rozmrazovacích cyklů na přírodní kámen. Norma obsahuje ustanovení jak pro kratší technologický zkušební postup, jímž se vyhodnocuje vliv zmrazovacích-rozmrazovacích cyklů na odpovídající vlastnosti, tak i pro identifikační zkušební postup.[15]

Tabulka 9 - Postup zkoušení a vyhodnocení dle ČSN EN 12371 [15]

ČSN EN 12371	
Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení mrazuvzdornosti	
Zkušební postup	
Zkušební tělesa a jejich počet	<ul style="list-style-type: none"> - identifikační zkouška: min. 7 zkušebních těles, které lze v bloku zkoušeného kamene považovat za reprezentativní, jedno z těles se použije pro monitorování středové teploty, - technologická zkouška: počet těles dle příslušné normy, požadovány 2 sady těles, první je vystavena zmrazovacím/rozmrazovacím cyklům a druhá je zkoušena bez podrobování těmto cyklům.
Cykly zmrazování-rozmrazování	<ul style="list-style-type: none"> - každý cyklus sestává z šestihodinové zmrazovací etapy na vzduchu, následované šestihodinovou rozmrazovací etapou, během níž jsou tělesa ponořena ve vodě, - počet cyklů se opakuje, dokud se tělesa nerozpadnou nebo do určeného max. počtu.
Vyhodnocení zkoušky	
<p>Technologická zkouška (zkouška A): vizuální hodnocení, jiné metody (např. změna pevnosti v ohybu), kdy po ukončení požadovaného počtu cyklů musí být tělesa zkoušena dle příslušné normy.</p> <p>Identifikační zkouška (zkouška B): použití dvou kritérií:</p> <p>a) před zkoušením a po 14, 56, 84 a 188 cyklech nebo po dosažení max. počtu cyklů, kdy provedeme vizuální kontrolu a měření dynamického modulu pružnosti (Youngův modul, min. po 28 cyklech.)</p> <p>b) před zkoušením a po dosažení max. počtu cyklů, kdy měříme zdánlivý objem.</p> <p>Pokud nejsou dvě a více těles poškozených, zkouška pokračuje. Kritériem hodnocení jsou: hodnocení z vizuální kontroly dosáhne stupně 3, snížení dynamického modulu pružnosti dosáhne 30 %.</p>	
Využití nedestruktivních metod zkoušení	
Norma uvádí využití nedestruktivní rezonanční metody zařízením pro měření dynamického modulu pružnosti - podrobně viz kap. 5.3.5.	

5.1.8 ČSN 72 2452 Zkouška mrazuvzdornosti malty

V normě je uveden postup zkoušení a hodnocení mrazuvzdornosti malty.

Tabulka 10 - Postup zkoušení a vyhodnocení dle ČSN 72 2452 [16]

ČSN 72 2452 Zkouška mrazuvzdornosti malty	
Zkušební postup	
Zkušební tělesa a jejich počet	<ul style="list-style-type: none"> - trámečky 40 x 40 x 160mm z řádně zatvrdlé malty, - potřebný počet sad dle počtu zmrazovacích etap, každá sada sestává ze tří trámečků, dvě sady slouží jako porovnávací, - nasycení těles po dobu 24 h ve vodní lázni, následně se ihned zmrazují,
Zmrazovací zařízení	<ul style="list-style-type: none"> - mrazicí prostor s regulovatelnou teplotou do $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ rozměrů takových, aby tělesa vyplňovala max. třetinu jeho objemu,
Cykly zmrazování-rozmrazování	<ul style="list-style-type: none"> - počet zmrazovacích cyklů a etap se stanoví s ohledem na požadovanou nebo předpokládanou mrazuvzdornost malty, - zpravidla 2 – 4 zmrazovací etapy, - 1 zmrazovací cyklus sestává z min. 4 h zmrazování a min. 2 h rozmrazování ve vodě $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, - zkouška se provádí po 28 dnech uložení.
Vyhodnocení zkoušky	
Výpočet úbytku hmotnosti v procentech hmotnosti zkoušených trámečků, pevnosti v tahu za ohybu trámečků a pevnosti v tlaku úlomků trámů, součinitel mrazuvzdornosti malty, tj. poměr aritmetického průměru hodnot pevnosti v tahu za ohybu trámečků proti pevnostem porovnávacích vzorků, musí být $\leq 25\%$ pevnosti porovnávacích vzorků.	
Využití nedestruktivních metod zkoušení	
Norma uvádí využití rezonanční metody – podrobně viz kap. 5.3.4.	

5.1.9 Zhodnocení

Stanovení mrazuvzdornosti betonu a dalších vybraných stavebních materiálů se liší především v požadavku na typ zkušebního tělesa, případně jeho zhotovení, počtu těchto zkušebních těles, délce zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů, postupu a kritérií pro posouzení mrazuvzdornosti.

Zkušební tělesa bývají většinou celými vzorky z výroby nebo vyřezané z výrobků vyráběných z běžné výroby anebo vzorky používané pro jiné zkoušky. V případě stanovení mrazuvzdornosti pálených zdících prvků se však zhotovuje zkušební panel z určeného počtu zdících prvků.

Metody jsou založené na střídavém zmrazování a rozmrazování vodou nasycených zkušebních těles, kdy zmrazování probíhá v mrazícím zařízení s teplotou vzduchu v rozmezí od -12 až -23 °C.

Charakteristiky, hodnotící mrazuvzdornost těchto prvků, jsou různé v závislosti na typu zkoušeného materiálu či výrobku. Kromě vizuálního posouzení jejich stavu se mrazuvzdornost hodnotí na základě změn (poklesu) některých z dále uvedených parametrů - pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v tlaku, objemové hmotnosti v suchém stavu, zdánlivého objemu, obsahu vlhkosti, ztráty hmotnosti a dynamického modulu pružnosti. U některých typů zkoušek se pro změny struktury materiálu využívá i nedestruktivních dynamických metod (ultrazvukové impulsové a rezonanční metody).

5.2 Dynamické nedestruktivní metody

Dynamické nedestruktivní metody též nazývány jako elektrodynamické či elektroakustické nedestruktivní metody se řadí do kategorie nedestruktivních metod zkoušení stavebních konstrukcí, výrobků či zkušebních vzorků, při kterém nedojde k jejich poškození. Pouze v případě nerovností či narušení povrchu je nezbytné povrchovou vrstvu odstranit např. obroušením.

Nedestruktivní metody můžeme dělit podle fyzikálního principu, na kterém jsou jednotlivé metody založeny (měří se jimi různé veličiny), anebo podle měřené veličiny, která může být zjišťována různými fyzikálními principy. Mezi nedestruktivní metody potom patří: tvrdoměrné metody, elektrodynamické metody, radiační metody a tenzometrické a trvanlivostní zkoušky. [2], [7]

Elektrodynamické metody jsou založeny na snímání a vyhodnocování účinků mechanického vlnění, vyvolaného ve zkoušeném materiálu mechanickým podnětem. [7]

K tomuto typu metod řadíme:

- ultrazvukovou impulsovou metodu – zjišťuje se doba průchodu ultrazvukového impulsu, rychlost šíření ultrazvukového impulsu materiálem, dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu, míra degradace materiálu, defekty ve struktuře.
- rezonanční metodu – zjišťuje se první vlastní kmitočet podélného, příčného a kroutivého kmitání, dynamických modulů pružnosti v tlaku a v tahu, dynamický modul pružnosti ve smyku, dynamický Poissonův koeficient.
- metodu fázových rychlostí – dynamické charakteristiky vozovek a podloží,
- metodu tlumeného rázu – tuhost a únosnost vrstev vozovek a podloží,
- metodu mechanické impedance – určení modulů pružnosti u vazkopružných materiálů (asfaltobetonové vozovky),

- metodu akustické emise – určení rozvoje vnitřních trhlin v materiálu,
- impakt-echo metodou – stanovení vnitřních nehomogenit v materiálu. [2]

5.2.1 Podstata ultrazvukové impulsové metody

Princip ultrazvukové impulsové metody je založen na vysílání svazků ultrazvukového vlnění, přičemž se měří doba potřebná pro průchod vln napětí v betonu určitou dráhou. Převážně se měří rychlost podélného vlnění a jen ve výjimečných případech rychlost příčného vlnění. Rychlost šíření ultrazvukového impulsu v tuhých tělesech závisí na pružných charakteristikách materiálu tělesa a na objemové hmotnosti. Na základě tohoto principu jsme dále schopni vyhodnotit a stanovit vlastnosti obyčejného i lehkého hutného betonu, přičemž nepotřebujeme pro zkoušení přesný geometrický tvar zkušební tělesa, což činí tuto metodu velmi výhodnou. [8], [17]

Dle průběhu šíření ultrazvukového impulsu v tuhých tělesech (změny rychlosti) lze stanovit, zdali se ve vnitřní struktuře zkoušeného materiálu vyskytují poruchy či defekty (např. trhliny, kaverny). Za pomoci této metody je možné místo porušení nejen lokalizovat, ale u trhlin zasahujících na povrch, určit i jejich hloubku, kterou trhlina zasahuje do vnitřní struktury materiálu. [17]

Pro hodnocení vlastností betonu se používá buď rychlost šíření podélného vlnění V , nebo z této rychlosti vypočítaný dynamický modul pružnosti E_{cu} , anebo pevnost betonu stanovená na základě kalibrace. Měřicí přístroje jsou vybaveny buď obrazovkou, na níž lze sledovat tvar prostředí prošlého vlnění, nebo digitálním počítačem, který udává čas průběhu vlnění. [18]

5.2.2 Podstata rezonanční metody

Rezonanční dynamickou metodou zjišťujeme hodnotu vlastní frekvence kmitání tělesa určitého geometrického tvaru. Metodou měření vlastních kmitočtů při podélném, příčném nebo krouživém kmitání hodnotíme vlastnosti zkoušeného betonu ze zjištěných hodnot vlastních kmitočtů. Nejčastěji se používají vzorky tvaru hranolu nebo válce, ze kterých dle teorie pružnosti můžeme odvodit přesné vztahy mezi vlastní frekvencí a pružnými charakteristikami betonu, modulem pružnosti a smykovým modulem, které z naměřených frekvencí chceme odvodit. [18]

Pro porovnávání pružných vlastností, případně kvality betonu, můžeme používat rezonanční dynamickou metodu i pro prutové prvky proměnného průřezu (prefabrikáty), kritériem zde však zůstává vlastní frekvence kmitání daného prvku. Na určení vlastní frekvence kmitání vzorky potřebují budící zařízení, které je schopné působit na vzorek

v příslušném směru mechanickými impulzy určité frekvence, s možností měnit tuto frekvenci. [7]

5.3. Nedestruktivní metody pro hodnocení mrazuvzdornosti - postupy kodifikované v technických normách

Postupy, podmínky a následná vyhodnocení nedestruktivních metod pro zkoušení a následná vyhodnocení mrazuvzdornosti a jiných charakteristik betonu nebo přírodního kamene jsou uvedeny v následujících normách:

- ČSN EN 12504-4 Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu,
- ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu,
- ČSN 73 1372 Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu,
- ČSN 73 1380 Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – Porušení vnitřní struktury,
- ČSN EN 14146 Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení dynamického modulu pružnosti (pomocí základní rezonanční frekvence).

Podrobněji jsou postupy zkoušení a vyhodnocení ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodou dle těchto technických norem uvedeny v podkapitolách 5.3.1 – 5.3.5.

5.3.1 ČSN EN 12504-4 Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu

Evropská norma popisuje metodu stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu.

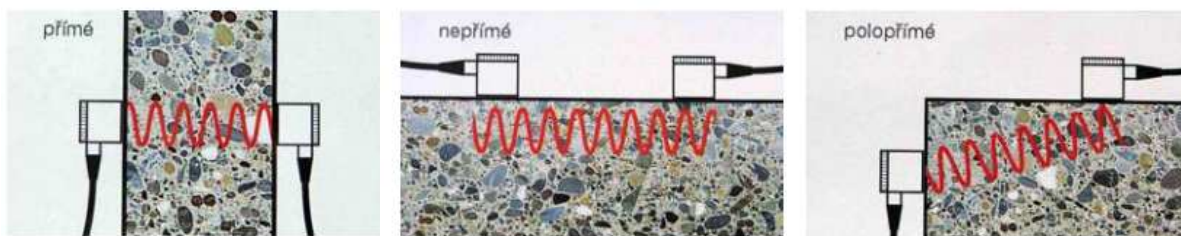
Princip zkoušky a zkušební zařízení

Na základě průchodu impulsu podélných vibrací známou délkou dráhy v betonu je přeměněn na elektrický signál snímačem a elektronický časový okruh umožňuje změřit dobu průchodu impulsu.

Zkušební zařízení sestává z elektrického generátoru vyvíjející impulsy, z dvojice budiče a snímače, zesilovače a elektronického měřiče rychlosti, který umožňuje změřit časový interval impulsu mezi vyvolaným náběžným čelem impulsu a přijímaným snímačem.[19]

Faktory ovlivňující měření rychlosti šíření ultrazvukového impulsu

- **vlhkost** – ovlivnění chemickým a mechanickým účinkem,
- **teplota betonu** – nutno dodržet teplotu betonu v rozmezí 10 °C až 30 °C,
- **měřicí základna**, tj. nejkratší vzdálenost mezi sondami, musí být dostatečně dlouhá, doporučeno min. 100 mm u betonu s max. zrnem kameniva 20 mm; min. 150 mm u betonu s max. zrnem kameniva mezi 20 mm a 40 mm,
- **tvar a velikost těles** – závislé na poměru bočního rozměru ku určité min. hodnotě,
- **vliv výztužných ocelí** – nutno se vyhnout měření v blízkosti ocelové výztuže rovnoběžné se směrem šíření impulsu prozvučení,
- **trhliny a dutiny**,
- **uspořádání sond (budiče a snímače)** – významně ovlivňuje čas, který uplyne při průběhu impulsu měřicí základnou, rozlišujeme následující typy prozvučování:
 - **přímé** – budič a snímač jsou umístěny na protilehlých stranách proti sobě (viz obrázek 2)
 - **polopřímé** – budič a snímač jsou umístěny na protilehlých stranách ne přímo proti sobě, anebo na sousedních stranách (viz obrázek 2)
 - **nepřímé** – budič a sonda jsou na stejné straně, měří se povrchové vlny (viz obrázek 2)

**Obrázek 2 - Typy prozvučování [2]****Zkušební postup**

Zkušební postup se volí dle druhu uspořádání sond. Měření musí být prováděno v trojrozměrném prostředí (u krychlí, kvádrů, válců a nosníků), pokud tomu tak není a provádí se v jednorozměrném (u prutů, hranolů, nosníků, atd.) či dvojrozměrném (tenké desky) prostředí, je nutno stanovenou rychlost přepočítat na rychlost v trojrozměrném prostředí. [19]

Povrchová úprava betonů by měla být dostatečně hladká, aby se za použití různých médií v podobě žluté vazeliny, mazacího tuku, apod. a přitlačení budiče a snímače k povrchu betonu, zajistilo dobrého akustického spojení. [2]

Vyhodnocení

Výstupem z měření je čas, který uplyne při průběhu impulsu měřicí základnou, ze kterého se vypočítá rychlost šíření ultrazvukového impulsu V dle vztahu (2).

$$V = \frac{L}{T} \quad [\text{km/s}] \quad (2)$$

kde

L délka měřicí základny, v mm,

T čas, který uplyne při průběhu impulsu měřicí základnou, v μs ,

5.3.2 ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu

Norma popisuje postup pro zkoušení a hodnocení vlastností obyčejného i lehkého hutného betonu na základě stanovení rychlosti šíření impulsu ultrazvukových podélných vln.

Princip ultrazvukové impulzové metody je založen na stanovení rychlosti šíření ultrazvukových vln v betonu. Ze stanovené rychlosti šíření ultrazvukového vlnění se určují fyzikálně mechanické vlastnosti na základě odvozených vztahů mezi rychlostí šíření tohoto vlnění a sledovanými vlastnostmi betonu. [20]

Měření průchodu ultrazvukových impulsů je třeba provádět při teplotě betonu v rozmezí 10 °C až 30 °C. Při měření za jiných teplot je třeba zjištěné hodnoty času průchodu ultrazvukového vlnění betonem opravit korekčním činitelem, stanoveným experimentálně pro daný přístroj a daný beton. [20]

Podmínky a postup při měření

Měření musí být prováděno v trojrozměrném prostředí (u krychlí, kvádrů, válců a nosníků), pokud tomu tak není a provádí se v jednorozměrném (u prutů, hranolů, nosníků, atd.) či dvojrozměrném (tenké desky) prostředí, je nutno stanovenou rychlost přepočítat na rychlost v trojrozměrném prostředí.

Optimální velikost měřicí základny u většiny používaných přístrojů při zkoušení na hutném betonu je v rozmezí 20 cm až 60 cm.

Pokud je ocelová výztuž rovnoběžná se směrem šíření impulsu a nachází se v blízkosti měření, doporučuje se takovému měření vyhnout.

Pro měření se využívá přístroj s pracovním kmitočtem budiče v rozsahu od 20 kHz do 150 kHz. [20]

Vyhodnocení vlastností

▪ Rychlost šíření ultrazvukového impulsu

Stanovuje se dle ČSN EN 12504-4 Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu, uvedeno v kapitole 5.3.1.

▪ Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu

Dynamický modulu pružnosti v tlaku a v tahu E_{cu} se vypočítá z naměřené rychlosti šíření ultrazvukového impulsu dle následujícího vztahu (3), (použita označení dle ČSN EN 12504-4 a ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu):

$$E_{cu} = D \cdot V^2 \cdot \frac{1}{k^2} \cdot 10^{-3} [\text{GPa}] \quad (3)$$

kde

- V rychlost šíření ultrazvukového impulsu, v $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$,
 D objemová hmotnost betonu, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
 k součinitel rozměrnosti prostředí (v případě měření v dvojrozměrném a jednorozměrném prostředí).

▪ Narušení betonu (změny struktury)

Při hodnocení narušení betonu musí být známé hodnoty rychlostí šíření ultrazvukových impulsů v neporušeném betonu. Narušení se posuzuje ze změn těchto veličin nebo ze změn zjišťovaných fyzikálně mechanických vlastností betonu, stanovené z kalibračního vztahu mezi ní a impulzovou rychlostí ultrazvukového vlnění. Ke stanovení narušení je doporučeno použít nepřímé prozvučování.

5.3.3 ČSN 73 1380 Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – Porušení vnitřní struktury

Norma uvádí tři zkušební metody pro stanovení odolnosti betonu při zmrazování a rozmrazování s ohledem na porušení vnitřní struktury. Její uplatnění se nachází především

pro porovnávání nových složek nebo nového složení betonu vzhledem ke složkám nebo složení betonu, které jsou známy a které mají pro dané prostředí odpovídající vlastnosti. Dále k posouzení výsledků zkoušek s některými absolutními číselnými hodnotami vycházející z místních zkušeností. [21]

Ke stanovení odolnosti betonu vůči zmrazování a rozmrazování norma popisuje následující tři typy zkušebních metod:

- zkouška na trámci,
- zkouška na desce (pro tuto zkoušku se používají zkušební tělesa deskového tvaru, která se vyříznou z betonových zkušebních těles),
- zkouška CIF (zkušebními tělesy pro tuto zkoušku jsou tělesa zhotovená rozdělením formy krychle o velikosti hrany 150 mm středovou deskou z polytetrafluorethylenu).

Vzhledem k tomu, že výrobky zkoušené v rámci experimentálních prací jsou cihly plné betonové ve tvaru kvádru, je v této kapitole podrobně uveden postup pouze pro zkoušku na trámci.

Zkouška na trámci

K tomuto typu zkoušky jsou využívány trávce 400 x 100 x 100 mm, které se podrobí zmrazování a rozmrazování v prostřední neionizované vody. Odolnost proti zmrazování a rozmrazování se zjišťuje jako relativní dynamický modul pružnosti použitím buď doby průchodu ultrazvukových impulzů, nebo vlastní příčné frekvence, a to po 56 zmrazovacích cyklech. [21]

Princip měření

Pro zkoušku se požadují nejméně tři trávce, které se po 7 dnech od jejich zhotovení ukládají do vodní lázně na dalších 21 dní. Následně je po 28 dnech od jejich zhotovení zahájen proces zmrazování a rozmrazování. Teplota vzduchu ve zmrazovací komoře nesmí klesnout pod $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po 8 hodinách zmrazovací fáze jsou trávce polévány vodou o teplotě $(13 \pm 8)\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo jsou vloženy do vodní lázně o teplotě $(13 \pm 8)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozmrazovací fáze trvá celkem 4 hodiny. Po (7 ± 1) , (14 ± 1) , (28 ± 1) , (42 ± 1) a 56 cyklech se tělesa zváží a stanoví se porušení vnitřní struktury na základě zvoleného pracovního postupu buď pro měření doby průchodu ultrazvukových impulzů (UPTT) nebo vlastní příčné frekvence (FF). [21]

Vyhodnocení

Dle použitého způsobu stanovení se hodnota porušení vnitřní struktury vypočítá na základě relativního dynamického modulu pružnosti RDM po n zmrazovacích a

rozmrazovacích cyklech, vyjádřený v procentech pro každé měření a každé zkušební těleso. [21]

Průměrná hodnota, jednotlivé hodnoty a směrodatná odchylka z každého zkušebního tělesa po 56 cyklech se použijí pro hodnocení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování.

Adsorpce vody je dodatková informace k hodnocení porušení vnitřní struktury a vypočítá se jako změna hmotnosti po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech v procentech. [21]

Relativní dynamický modul pružnosti RDM_{FF} v procentech po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech se vypočítá dle vztahu (4):

$$RDM_{FF,n} = \left(\frac{f_n}{f_o} \right)^2 \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

kde:

RDM_{FF} je relativní dynamický modul pružnosti, v %, stanovený použitím FF,
 f_n vlastní frekvence měřená po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech, v Hz,
 f_o počáteční vlastní frekvence, v Hz.

Relativní dynamický modul pružnosti RDM_{UPPT} v procentech se vypočítá dle vztahu (5):

$$RDM_{UPPT,n} = \left(\frac{t_{S,0}}{t_{S,n}} \right)^2 \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

kde:

RDM_{UPPT} je relativní dynamický modul pružnosti po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech, v %, stanovený použitím UPTT,
 $t_{S,0}$ počáteční doba průchodu ultrazvukových impulsů zkušebním tělesem, v μs ,
 $t_{S,n}$ doba průchodu ultrazvukových impulsů tělesem po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech, v μs .

5.3.4 ČSN 73 1372 Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu

Tato norma uvádí postup zkoušení metodou měření vlastních kmitočtů při podélném, příčném nebo kroutivém kmitání a hodnocení vlastností zkoušeného betonu ze zjištěných hodnot vlastních kmitočtů, tj. stanovení především dynamických modulů pružnosti (v tahu a

tlaku, ve smyku), popř. dynamického Poissonova koeficientu a charakteristiky tlumení betonu. Na základě těchto vyhodnocených charakteristik lze odvodit další vlastnosti betonu (např. změny pevnosti, změny kvality betonu s časem). [22]

Zkušební tělesa se využívají tvaru hranolu, válců či jiných geometrických tvarů. Pokud jsou tělesa jiného materiálu, lze je taktéž zkoušet dle zásad a metodiky této normy, pokud je na nich možné spolehlivě změřit vlastní frekvence kmitání. [22]

Kmitočet vzorku závisí na velikosti, tvaru, objemové hmotnosti a modulu pružnosti materiálu vzorku.

Na základě zjištěných vlastních frekvencí kmitání betonových zkušebních těles lze stanovit následující charakteristiky materiálu:

- dynamický modul pružnosti betonu v tlaku a v tahu,
- dynamický modul pružnosti betonu ve smyku,
- dynamický Poissonův koeficient betonu,
- a další jiné vlastnosti jako např. degradace betonu, statický modul pružnosti, rovnoměrnost výroby, ad. [22]

Postup měření a vyhodnocení

Pro zkoušení betonu rezonanční metodou nutno používat zařízení a přístroje umožňující zjištění rezonančních kmitočtů mechanického kmitání zkušební tělesa.

▪ Stanovení rezonanční frekvence

Ke zkušebnímu vzorku umístěného na podložce z gumy nebo jiného pružného materiálu se přiloží sondy zkušební přístroje v místech vhodných pro vznik požadovaného kmitání a v místech předpokládaných maximálních amplitud kmitání. Postupnou změnou kmitočtu budícího oscilátoru v oblasti předpokládané rezonance, uvedeme zkušební těleso do požadovaného kmitání. Na indikačním zařízení sledujeme amplitudu kmitání zkušební tělesa. Sledovaná max. amplituda ukazuje, že došlo k rezonanci, tzn. shodě kmitočtu budícího oscilátoru s vlastním kmitočtem zkušební tělesa. [22]

▪ Stanovení modulu pružnosti betonu E_{crL} z vlastního kmitočtu podélného kmitání

Ke zkušebním tělesům tvaru hranolu nebo válce, uložených v polovině své délky na podložce, se přiloží zkušební sondy přístroje (budič a snímač) do podélné osy vzorku a zjistí se první (nejmenší) vlastní kmitočet podélného kmitání zkušební tělesa.

Hodnota dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku nebo v tahu E_{crL} , v MPa při podélném kmitání zkušební tělesa se určí ze vztahu (6):

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot D \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

kde

- L délka zkoušeného tělesa, v m,
- f_L první vlastní kmitočet podélného kmitání zkoušeného tělesa, v kHz,
- D objemová hmotnost betonu, v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

▪ **Stanovení modulu pružnosti betonu E_{crf} z vlastního kmitočtu příčného kmitání**

Ke zkušebním tělesům tvaru hranolu nebo válce uložených na podložkách se přiloží zkušební sondy přístroje (budič a snímač) kolmo k podélné ose na kraji, a zjistí se první (nejmenší) vlastní kmitočet příčného (ohybového) kmitání zkušební tělesa. [22]

▪ **Stanovení modulu pružnosti betonu ve smyku G_{cr} , z vlastního kmitočtu krouťivého kmitání**

Ke zkušebním tělesům tvaru hranolu nebo válce, uložených v polovině své délky na podložce, se přiloží zkušební sondy přístroje (budič a snímač) kolmo k podélné ose vzorku, mimoběžně a zjistí se první (nejnižší) kmitočet krouťivého kmitání zkušební tělesa. [22]

▪ **Stanovení dynamického Poissonova koeficientu**

Výpočet dynamického Poissonova koeficientu ν_{cr} dle vztahu (7) nebo přímo z hodnot vlastních kmitočtů dle vztahu (8):

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{E_{cr}}{G_{cr}} - 2 \right) \quad (7)$$

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{f_L^2}{f_t^2} - 2 \right) \quad (8)$$

kde

- E_{cr} a G_{cr} jsou dynamické moduly pružnosti betonu, zjištěné z hodnot vlastních kmitočtů podélného a krouťivého kmitání zkušební tělesa, v MPa,
- k koeficient závislý na tvaru průřezu, vyjádřený jako poměr polárního momentu setrvačnosti průřezu k modulu tuhosti v kroucení,
- f_L, f_t hodnoty prvních vlastních kmitočtů podélného a krouťivého kmitání zkušební tělesa, v Hz.

Výsledné charakteristiky se používají k posouzení změn kvality betonu v závislosti na čase podle měnicích se hodnot dynamických modulů pružnosti betonu vlivem hydratace, změny teploty, dále na posouzení změn kvality betonu v důsledku působení mrazu, agresivního prostředí apod. Pro posouzení změn kvality betonu se používají změny vlastních kmitočtů, dále vztahy mezi dynamickými moduly pružnosti a statickými moduly pružnosti a také vztahy mezi dynamickým modulem pružnosti a příslušným druhem pevnosti betonu.

5.3.5 ČSN EN 14146 Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení dynamického modulu pružnosti (pomocí základní rezonanční frekvence)

Norma určuje postupy stanovení základní rezonanční frekvence přírodního kamene a výpočet dynamického přetvárného modulu.

Stanovení základní rezonanční frekvence probíhá pomocí dvou metod v závislosti na metodě použité pro kmitání zkušební tělesa. Princip první metody je založen na nepřerušovaném kmitání a princip druhé metody na kmitání přerušovaném. Obě metody využívají rozkmitání zkušební tělesa pomocí podélných, ohybových nebo torsních kmitů, a následném určení odpovídající základní rezonanční frekvence. [23]

Princip a postup měření

Při stanovení základní rezonanční frekvence za použití nepřerušovaného excitačního módu, využíváme k měření střídavý frekvenční generátor, s frekvenčním rozsahem min. 20 kHz. Pokud probíhá měření s využitím přerušovaného excitačního módu, používáme mechanický generátoru pulsů, jímž může být kladivo nebo elektrický generátor.

Zkušební tělesa jsou tvaru hranolů nebo válců a vybírají se z homogenní sady, přičemž jejich počet musí být minimálně šest zkušebních těles. Změří se jejich rozměry a následně upevní vysílač a přijímač. Za pomoci vybraného vibračního módu F_L (podélná základní rezonanční frekvence, v Hz), F_F (ohybová základní rezonanční frekvence, v Hz) a F_T (torsní základní rezonanční frekvence, v Hz) se zjistí základní rezonanční frekvence. [23]

U nepřerušovaného budícího módu se změří budící frekvence pomocí měřiče, dokud nezačne zkušební těleso rezonovat. Ve chvíli, kdy přijímač zaznamená maximální energii, dojde k počátku resonování tělesa, který se zaznamená. Na měřiči frekvencí se přečte základní rezonanční frekvence F_L , F_T a F_F . [23]

V případě přerušovaného budícího módu se nechá těleso kmitat tak dlouho, dokud se nedosáhne tří následných hodnot kolem ± 60 Hz základní rezonanční frekvence. [23]

Výpočet podélného dynamického modulu pružnosti pomocí podélné rezonanční frekvence

Výpočet ze základní rezonanční frekvence podélné vibrace F_L pro **jakákoliv zkušební tělesa**, je dán rovnicí (9):

$$Ed_L = 4 \cdot 10^{-6} \cdot \ell^2 \cdot F_L^2 \cdot \rho \cdot T \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$

v níž T je korekční faktor, závislý na i a ν , jenž je určen rovnicí (10):

$$T = 1 + \frac{\pi^2 \cdot \nu \cdot i^2}{\ell^2} \quad (10)$$

kde

- ℓ délka zkušební tělesa, v mm,
- F_L podélná základní rezonanční frekvence, v Hz,
- ρ měrná hmotnost zkušební tělesa, v kg/m^3 ,
- T korekční faktor pro výpočet Ed_L ,
- ν Poissonův koeficient,
- i průměr výkyvu průřezu zkušební tělesa, v mm,

$$i = \sqrt{\frac{1}{A}} \quad [\text{mm}], \quad (11)$$

- A plocha průřezu zkušební tělesa.

Výpočet dynamického modulu pružnosti ze základní rezonanční frekvence podélné vibrace F_L pro **přednostní zkušební tělesa**, které jsou tvaru hranolu s délkou $4b$ nebo válce s délkou $4d$ nebo $3d$, dle vztahu (12):

$$Ed_L = 4 \cdot 10^{-6} \cdot \ell^2 \cdot F_L^2 \cdot \rho \quad [\text{MPa}] \quad (12)$$

kde:

- b šířka zkušební tělesa tvaru hranolu, v mm,
- d průměr válcového zkušební tělesa, v mm,
- ℓ délka zkušební tělesa, v mm,
- F_L podélná základní rezonanční frekvence, v Hz,
- ρ měrná hmotnost zkušební tělesa, v kg/m^3 ,
- T korekční faktor pro výpočet Ed_L

5.3.6 Kritéria pro hodnocení mrazuvzdornosti s využitím nedestruktivních metod

Vyžití dynamických nedestruktivních metod při zkoušce mrazuvzdornosti je kodifikováno v následujících technických normách a mrazuvzdornost z parametru nedestruktivního zkoušení se hodnotí následovně:

- **Beton – dle ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu**, beton je mrazuvzdorný na ten počet cyklů, při kterém součinitel mrazuvzdornosti není menší než 75 % nebo ukazatel nedestruktivní zkoušky dosáhl hodnoty určující mrazuvzdornost dle příslušných norem nebo předpisů. [10]
- **Beton – dle ČSN 73 1380 Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřní struktury**, porovnání vzhledem ke složkám nebo složení betonu, které jsou známy a které mají pro dané prostředí odpovídající vlastnosti, nebo k posouzení výsledků zkoušek s některými absolutními číselnými hodnotami vycházející z místních zkušeností. [21]
- **Přírodní kámen – dle ČSN EN 12371 Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení mrazuvzdornosti**, zkouška pokračuje, dokud nejsou dvě nebo více zkušebních těles klasifikována jako porušená, s použitím jednoho z kritérií:
 - hodnocení z vizuální kontroly dosáhne stupně 3,
 - snížení dynamického modulu pružnosti dosáhne 30 %. [15]
- **Malta – ČSN 72 2454 Zkouška mrazuvzdornosti malty**, po zmrazovacím cyklu, při kterém byl zjištěn pokles dynamického modulu pružnosti E_d (při nedestruktivním vyšetřování jakosti) větší než 25 % proti hodnotě E_d zjištěného na první porovnávací sadě. [16]

5.3.7 Zhodnocení

V předchozích kapitolách byly analyzovány postupy zkoušení mrazuvzdornosti z hlediska využívání dynamických nedestruktivních metod pro beton, přírodní kámen, pórobeton, pálené zdící prvky, vápenopískové zdící prvky a malty.

Dynamické nedestruktivní metody jsou využívány při zkoušce mrazuvzdornosti betonu, malty a přírodního kamene, konkrétně:

- beton – využití ultrazvukové impulsové a rezonanční metody,
- přírodní kámen a malty – využití rezonanční metody.

Pro hodnocení betonu na základě měření uvedenými nedestruktivními metodami v normách ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu i v ČSN 73 1380 Zkoušení

odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřní struktury nejsou uvedeny konkrétní kritéria, je v nich uveden pouze odkaz na příslušné normy a předpisy, které však neexistují.

Při hodnocení mrazuvzdornosti malt a přírodního kamene se vychází z dynamického modulu pružnosti a jsou uvedeny i limitní hodnoty jejich poklesu, po jejichž dosažení se má zkouška ukončit (v případě malt je touto limitní hodnotou 25 % a u přírodního kamene je to 30 %).

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

6.1 Metodika měření a vyhodnocení výsledků měření ultrazvukovou impulzovou metodou

6.1.1 Zkušební vzorky

Pro experimentální práce byly použity betonové tvárnice, konkrétně vibrolisovaná betonová cihla lícová, viz obrázek 3.

Vlastnosti betonové cihly deklarované výrobcem jsou uvedeny v následující tabulce 10:



Obrázek 3 – Betonová cihla lícová

Tabulka 11 - Deklarované parametry betonové cihly lícové

Základní charakteristika	Vlastnost		
Rozměr cihly	240	115	70
Rozměrová tolerance, (kategorie D1)	Délka	Šířka	Tloušťka
	+ 3 mm	+ 3 mm	+ 3 mm
	- 5 mm	- 5 mm	- 5 mm
Objemová hmotnost	min. 1900 kg/m ³		
Pevnost v tlaku průměrná, kolmo na ložnou plochu	30 MPa		
Mrazuvzdornost	50 cyklů		
Nasákavost	$\leq 150 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$		
Propustnost vodních par	5/15 (faktor difúzního odporu – tabulková hodnota)		
Reakce na oheň	Třída A1		
Přídržnost (stanovená hodnota)	0,15 MPa		
Hmotnostní aktivita 226Ra	$\leq 150 \text{ Bq/kg}$		
Index hmotnostní aktivity	$\leq 0,35$		
Ekvivalentní tepelná vodivost	1,3 W/m·K		

6.1.2 Rozdělení a příprava vzorků pro zkoušky

Na základě měření ultrazvukovou impulsovou metodou byly zkušební vzorky (cihly) rozděleny do jednotlivých sad pro zkoušení mrazuvzdornosti. Pro zkoušky bylo k dispozici celkem 48 cihel, proto ve srovnávací sadě byly zkoušeny pouze 2 cihly.

Pro každý počet zkušebních cyklů byla připravena sada cihel, které sestávala z osmi vzorků, konkrétně:

- **Srovnávací sada A** - 2 cihly, na kterých byla provedena nedestruktivní měření a stanovení pevnosti v tlaku v termínu zahájení zkoušek mrazuvzdornosti (požadavek normy), celkem 6 sad
- **Srovnávací sada B** - 3 cihly, na kterých byla provedena nedestruktivní měření v termínu zahájení zkoušek mrazuvzdornosti a po ukončení stanoveného počtu zmrazovacích cyklů, a zkouška pevnosti v tlaku po ukončení stanoveného počtu zmrazovacích cyklů (nad rámec požadavku normy - nenormový postup), celkem 6 sad
- **Zkušební sada C** - 3 cihly, na kterých byla prováděna zkouška mrazuvzdornosti, celkem 6 sad

Stáří vzorků před zahájením zkoušky mrazuvzdornosti bylo 35 dní. Před zahájením zkoušek byly všechny tyto zkušební cihly nasyceny vodou po dobu 3 dnů.

6.1.3 Zkouška mrazuvzdornosti

Mrazuvzdornost betonových cihel byla zkoušena v souladu s ČSN 73 1322 (viz kapitola 5.1.2), kde deklarovaný počet zkušebních cyklů výrobcem je 50.

Pro zhodnocení využitelnosti ultrazvukové impulsové metody byly jednotlivé sady cihel zkoušeny na 25 - 50 - 75 - 100 - 125 a 150 zmrazovacích cyklů.

Měření ultrazvukovou impulsovou metodou bylo na zkoušených cihlách prováděno před zahájením zmrazovacích cyklů, a následně vždy po 25 cyklech až do dosažení požadovaného počtu cyklů. Po ukončení stanoveného počtu zmrazovacích cyklů, byla provedena zkouška pevnosti v tlaku.

Na základě zkoušek pevnosti v tlaku (metodika viz kap. 6.1.5), byl vypočítán součinitel mrazuvzdornosti ze vztahu (13) ve dvou variantách:

Stanovení součinitelů mrazuvzdornosti**a) Součinitel mrazuvzdornosti z pevnosti v tlaku - výpočet dle ČSN 73 1322:**

$$K_{1,n} = \frac{R_{c,mraz,n}}{R_{c0,n}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (13)$$

kde

$K_{1,n}$ součinitel mrazuvzdornosti pro n zmrazovacích cyklů, v %,

$R_{c,mraz,n}$ aritmetický průměr pevností v tlaku vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti po n zmrazovacích cyklech, v MPa,

$R_{c0,n}$ aritmetický průměr pevností v tlaku srovnávacích vzorků v termínu zahájení zkoušek mrazuvzdornosti, v MPa.

b) Součinitel mrazuvzdornosti z pevnosti v tlaku - nenormový postup:

$$K_{2,n} = \frac{R_{c,mraz,n}}{R_{c,n}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (14)$$

kde

$K_{2,n}$ součinitel mrazuvzdornosti pro n zmrazovacích cyklů, v %,

$R_{c,mraz,n}$ aritmetický průměr pevností v tlaku vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti po n zmrazovacích cyklech, v MPa,

$R_{c,n}$ aritmetický průměr pevností v tlaku srovnávacích vzorků po i zmrazovacích cyklech, v MPa,

Dále byly pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel navíc stanoveny následující součinitele mrazuvzdornosti, které vycházejí ze změn rychlostí průchodu ultrazvukového impulzu materiálem a hodnot dynamických modulů pružností v tlaku a tahu, v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů:

c) Součinitel mrazuvzdornosti z rychlosti šíření ultrazvukového impulzu:

Z rychlosti šíření ultrazvukového impulzu V jsme dle principu výpočtu součinitele mrazuvzdornosti z pevnosti v tlaku (13) stanovili součinitele mrazuvzdornosti, který charakterizuje mrazuvzdornost betonu na základě rychlosti šíření ultrazvukového impulzu ve vzorcích před začátkem jejich zmrazování a po ukončení jejich příslušené zmrazovací etapy.

Součinitel byl stanoven dle vztahu (15):

$$K_{V,i} = \frac{V_{mraz,n}}{V_{0,n}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (15)$$

kde

$V_{mraz,n}$ aritmetický průměr rychlostí šíření ultrazvukového impulzu vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti po n zmrazovacích cyklech, v km/s,
 $V_{0,n}$ aritmetický průměr rychlostí šíření ultrazvukového impulzu vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti v termínu zahájení zkoušek mrazuvzdornosti, v km/s,

d) Součinitel mrazuvzdornosti z dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu

Z dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu E_{CU} jsme dále dle principu výpočtu součinitele mrazuvzdornosti z pevnosti v tlaku (13) stanovili součinitele, který charakterizuje mrazuvzdornost betonu z hodnot dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu E_{CU} vzorků před začátkem jejich zmrazování a z dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu po ukončení jejich příslušné zmrazovací etapy.

Součinitel byl stanoven dle následujícího vztahu (16):

$$K_{E,i} = \frac{E_{CU,mraz,n}}{E_{CU0,n}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (16)$$

kde

$E_{CU,mraz,n}$ aritmetický průměr dynamických modulů pružností v tlaku a tahu vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti po n zmrazovacích cyklech, v GPa,
 $E_{CU0,n}$ aritmetický průměr dynamických pružností v tahu a tlaku vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti v termínu zahájení zkoušek mrazuvzdornosti, v GPa,

6.1.4 Měření ultrazvukovou impulzovou metodou

Postup měření a vyhodnocení vycházel z ČSN EN 12504-4 Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu (viz kap. 5.3.1) a ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu (viz kap. 5.3.2).

- **Zkušební zařízení:** Digitální ultrazvukový přístroj TICO (viz obr. 4) s vlastní frekvencí sond 150 kHz; kalibrační prvek.



Obrázek 4 - Ultrazvukový přístroj TICO a způsob přímého prozvučování

- **Postup měření:** Přímé prozvučování přes délku cihly, viz obr. 4. Pro dosažení dobré akustické vazby byl použit indiferentní gel. Měření byla prováděna na každé cihle ve třech měřících bodech, viz obr. 5.



Obrázek 5 – Vyznačení měřících míst na cihle

Pro zajištění reprodukovatelnosti měření byly zkoušeny vzorky nasycené vodou, čímž byl eliminován vliv vlhkosti na výsledky měření.

6.1.5 Vyhodnocení výsledků měření ultrazvukovou impulzovou metodou a zkoušky pevnosti v tlaku

Výstupem z měření ultrazvukovou impulzovou metodou byl čas, který uplyne při průběhu impulsu měřicí základnou, z nějž byly vypočítány následující parametry dle příslušných norem:

- ČSN EN 12504-4 Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu, viz kap. 5.3.1,
- ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu, viz kap. 5.3.2,

- **Rychlost šíření ultrazvukového impulsu V , dle vztahu (2):**

$$V = \frac{L}{T} \quad [\text{km/s}] \quad (2)$$

kde

L délka měřicí základny, v mm,

T čas, který uplyne při průběhu impulsu měřicí základnou, v μs .

- **Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu E_{cu} , dle vztahu (3):**

$$E_{\text{cu}} = D \cdot V^2 \cdot \frac{1}{k^2} \cdot 10^{-3} \quad [\text{GPa}] \quad (3)$$

kde

V rychlost šíření ultrazvukového impulsu, v $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$,

D objemová hmotnost betonové cihly, v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, (postup stanovení dle ČSN EN 12390-7, viz následující kap. a viz vztah 15),

k součinitel rozměrnosti prostředí - nebyl uvažován, protože byl stanovován dynamický modul pružnosti v trojrozměrném prostředí.

- **Relativní dynamický modul pružnosti RDM_{UPPT} dle vztahu (5):**

$$\text{RDM}_{\text{UPPT},n} = \left(\frac{t_{\text{S},0}}{t_{\text{S},n}} \right)^2 \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

kde

RDM_{UPPT} relativní dynamický modul pružnosti po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech, (stanovený použitím doby průchodu ultrazvukového impulsu), v %,

$t_{S,0}$	počáteční doba průchodu ultrazvukových impulzů zkušebním tělesem, v μs ,
$t_{S,n}$	doba průchodu ultrazvukových impulzů tělesem po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech, v μs .

Objemová hmotnost a pevnost v tlaku byly stanoveny dle postupu v souladu s následujícími normami:

- ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu, [28],
- ČSN EN 772-1+A1 Zkušební metody pro zdící prvky – Část 1: Stanovení pevnosti v tlaku, [26],

Stanovení objemové hmotnosti

U zdících prvků se objemová hmotnost zkušebních stanovuje za sucha dle ČSN EN 772-13 Zkušební metody pro zdící prvky - Část 13: Stanovení objemové hmotnosti materiálu zdících prvků za sucha a objemové hmotnosti zdících prvků za sucha [25]

(kromě zdících prvků z přírodního kamene). Proto pro zjištění objemové hmotnosti cihel nasycených vodou byl zvolen postup dle ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. [28]

Cihly byly zváženy a objem byl stanoven vypočítáním ze změřených rozměrů (postup dle ČSN EN 772-16 Zkušební metody pro zdící prvky – Část 16: Stanovení rozměrů). [27]

Objemová hmotnost byla vypočítána z následujícího vztahu (15):

$$D = \frac{m}{V} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (15)$$

kde

m hmotnost zkušebního tělesa v podmínkách v době zkoušení, v kg,

V objem stanovený příslušným způsobem, v m^3 ,

Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku vzorků byla stanovena postupem uvedeným v ČSN EN 772-1+A1 Zkušební metody pro zdící prvky – Část 1: Stanovení pevnosti v tlaku.

Vzorky byly do zkušebního lisu vkládány ložnou plochou a zatěžovány kolmo na tuto plochu, viz obrázek 6. Zatěžování vzorku probíhalo plynule zvyšující se rychlostí až do dosažení síly, maximálního zatížení, které nastane při porušení vzorku. [26]



Obrázek 6 - Vzorek ve zkušebním lisu před zkouškou pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla následně vypočítána dle vztahu (16):

$$R_c = \frac{F}{A} \text{ [MPa]} \quad (16)$$

kde

F maximální zatížení při porušení v zatěžovacím lisu, v N,

A tlačaná plocha vzorku stanovená ze vztahu (17):

$$A = l \cdot š \text{ [mm}^2\text{]} \quad (17)$$

kde

l délka zkušebního vzorku, v mm,

$š$ šířka zkušebního vzorku, v mm,

6.2 Výsledky měření a zkoušek

Výsledky měření, zkoušek a z nich vypočítané další charakteristiky jsou uvedeny v následujících tabulkách 10 - 17:

Tabulka 12 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – srovnávací vzorky v termínu zahájení zkoušek mrazuvzdornosti

POČET CYKLŮ n	OZNAČENÍ VZORKU i	$T_{0,i}$ [μs]	$V_{0,i}$ [km/s]	$D_{0,i}$ [kg/m ³]	$E_{CU0,i}$ [GPa]	$R_{c0,i}$ [MPa]
25	16	59,9	3,992	2166	34,52	41,2
	32	59,5	4,010	2160	34,74	44,8
PRŮMĚRNÉ HODNOTY		59,7	4,001	2163	34,63	43,0
50	30	59,7	3,997	2162	34,55	42,2
	39	59,9	3,988	2135	33,96	50,6
PRŮMĚRNÉ HODNOTY		59,8	3,993	2149	34,26	46,4
75	3	59,6	4,021	2169	35,05	43,6
	10	59,6	4,018	2167	34,99	49,9
PRŮMĚRNÉ HODNOTY		59,6	4,020	2168	35,02	46,8
100	19	58,9	4,053	2171	35,67	45,1
	24	59,4	4,024	2172	35,17	49,4
PRŮMĚRNÉ HODNOTY		59,1	4,038	2172	35,42	47,2
125	7	59,2	4,039	2174	35,46	46,2
	9	59,3	4,032	2174	35,34	50,3
PRŮMĚRNÉ HODNOTY		59,2	4,035	2174	35,40	48,2
150	4	58,7	4,074	2177	36,13	51,2
	26	59,8	3,997	2178	34,81	50,5
PRŮMĚRNÉ HODNOTY		59,3	4,036	2178	35,47	50,8

Tabulka 13 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – srovnávací vzorky po ukončení n-tého zmrazovacího cyklu

POČET CYKLŮ n	OZNAČENÍ VZORKU i	$T_{SR,i}$ [μs]	$V_{SR,i}$ [km/s]	$D_{SR,i}$ [kg/m ³]	$E_{CU,SR,i}$ [GPa]	$R_{c,SR,i}$ [MPa]
25	1	59,4	4,030	2135	34,67	42,7
	2	58,9	4,059	2147	35,37	47,7
	22	59,1	4,046	2165	35,45	45,4
PRŮMĚRNÉ HODNOTY		59,2	4,045	2149	35,16	45,3
50	6	58,7	4,072	2176	36,08	49,8
	33	58,5	4,088	2174	36,32	49,9
	50	58,6	4,071	2180	36,12	50,0
PRŮMĚRNÉ HODNOTY		58,6	4,077	2176	36,17	49,9
75	25	58,0	4,116	2183	36,97	54,7
	31	57,8	4,129	2177	37,12	48,8
	37	57,9	4,123	2178	37,02	50,9
PRŮMĚRNÉ HODNOTY		57,9	4,122	2179	37,03	51,5
100	42	58,2	4,110	2192	37,03	52,5
	43	57,6	4,140	2187	37,49	52,5
	45	57,9	4,131	2185	37,29	51,6
PRŮMĚRNÉ HODNOTY		57,9	4,127	2188	37,27	52,2
125	11	57,3	4,170	2194	38,16	52,2
	15	57,6	4,145	2197	37,74	50,7
	29	57,4	4,158	2199	38,02	48,2
PRŮMĚRNÉ HODNOTY		57,5	4,157	2197	38,97	50,4
150	5	57,2	4,174	2199	38,32	51,8
	21	57,3	4,170	2195	38,18	50,5
	47	57,2	4,177	2203	38,42	52,9
PRŮMĚRNÉ HODNOTY		57,3	4,174	2199	38,31	51,7

Tabulka 14 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – vzorky ze zkoušky mrazuvzdornosti na 25 zkušebních cyklů

POČET CYKLŮ <i>n</i>	OZNAČENÍ VZORKŮ <i>i</i>	T _{1,i} [μs]	T _{2,i} [μs]	T _{3,i} [μs]	T _i [μs]	V _{1,i} [km/s]	V _{2,i} [km/s]	V _{3,i} [km/s]	V _i [km/s]	D _i [kg/m ³]	E _{CUi} [GPa]	R _{c,mraz,i} [MPa]
0	34	59,1	59,0	59,1	59,1	4,044	4,051	4,047	4,047	2153	35,26	-
	35	60,1	60,4	60,7	60,4	3,968	3,952	3,932	3,951	2125	33,18	-
	41	58,9	59,7	60,7	59,7	4,053	3,995	3,932	3,993	2158	34,42	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					59,7				3,997	2145	34,29	-
25	34	58,2	58,2	58,4	58,3	4,107	4,107	4,092	4,102	2158	36,31	47,6
	35	59,2	59,6	59,6	59,5	4,032	4,002	4,002	4,012	2134	34,34	45,0
	41	58,5	59,5	60,3	59,4	4,077	4,008	3,955	4,014	2169	34,94	44,8
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					59,1				4,042	2153	35,20	45,8
VIZUÁLNÍ POSOUZENÍ		BEZ ZÁVAD										

Tabulka 15 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – vzorky ze zkoušky mrazuvzdornosti na 50 zkušebních cyklů

POČET CYKLŮ <i>n</i>	OZNAČENÍ VZORKŮ <i>i</i>	T _{1,i} [μs]	T _{2,i} [μs]	T _{3,i} [μs]	T _i [μs]	V _{1,i} [km/s]	V _{2,i} [km/s]	V _{3,i} [km/s]	V _i [km/s]	D _i [kg/m ³]	E _{CUi} [GPa]	R _{c,mraz,i} [MPa]
0	17	60,0	59,9	60,2	60,0	3,980	3,987	3,970	3,979	2163	34,24	-
	27	59,8	59,3	59,5	59,5	3,995	4,025	4,015	4,012	2176	35,03	-
	36	59,7	59,0	58,8	59,2	4,000	4,047	4,061	4,036	2165	35,27	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					59,6				4,009	2168	34,85	-
25	17	59,4	59,4	59,9	59,6	4,024	4,020	3,987	4,010	2170	34,90	-
	27	59,0	59,0	58,9	59,0	4,046	4,046	4,056	4,049	2186	35,84	-
	36	59,5	58,9	58,8	59,0	4,013	4,058	4,065	4,045	2181	35,70	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					59,2				4,035	2179	35,48	-
50	17	59,3	59,3	60,1	59,5	4,030	4,030	3,977	4,012	2175	35,02	44,8
	27	59,1	58,9	58,9	59,0	4,042	4,053	4,053	4,049	2191	35,93	53,6
	36	61,6	60,7	60,7	61,0	3,880	3,934	3,934	3,916	2187	33,54	47,3
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					59,8				3,993	2185	34,83	48,6
VIZUÁLNÍ POSOUZENÍ		BEZ ZÁVAD										

Tabulka 16 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – vzorky ze zkoušky mrazuvzdornosti na 75 zkušebních cyklů

POČET CYKLŮ <i>n</i>	OZNAČENÍ VZORKŮ <i>i</i>	T _{1,i} [μs]	T _{2,i} [μs]	T _{3,i} [μs]	T _i [μs]	V _{1,i} [km/s]	V _{2,i} [km/s]	V _{3,i} [km/s]	V _i [km/s]	D _i [kg/m ³]	E _{CUi} [GPa]	R _{c,mraz,i} [MPa]
0	18	59,4	59,4	59,5	59,4	4,025	4,022	4,019	4,022	2167	35,05	-
	20	59,1	58,8	58,9	58,9	4,047	4,065	4,058	4,057	2168	35,68	-
	23	58,9	58,9	59,3	59,0	4,056	4,056	4,029	4,047	2156	35,30	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					59,1				4,042	2163	35,34	-
25	18	58,9	59,2	59,6	59,2	4,056	4,039	4,012	4,036	2174	35,40	-
	20	58,9	58,4	58,5	58,6	4,058	4,096	4,085	4,080	2180	36,29	-
	23	58,6	58,7	59,0	58,7	4,077	4,073	4,053	4,068	2165	35,82	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					58,8				4,061	2173	35,84	-
50	18	59,1	59,4	60,1	59,5	4,046	4,022	3,978	4,015	2179	35,14	-
	20	59,9	59,0	59,1	59,3	3,993	4,054	4,044	4,031	2186	35,51	-
	23	58,6	58,7	59,2	58,8	4,077	4,070	4,035	4,061	2169	35,77	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					59,2				4,036	2178	35,47	-
75	18	60,4	60,6	62,0	61,0	3,959	3,942	3,856	3,919	2185	33,56	45,9
	20	67,3	62,5	62,1	64,0	3,551	3,827	3,849	3,742	2192	30,70	50,0
	23	59,1	58,9	60,0	59,3	4,042	4,059	3,985	4,029	2175	35,30	45,3
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					61,4				3,897	2184	33,19	47,1
VIZUÁLNÍ POSOUZENÍ		BEZ ZÁVAD										

Tabulka 17 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – vzorky ze zkoušky mrazuvzdornosti na 100 zkušebních cyklů

POČET CYKLŮ <i>n</i>	OZNAČENÍ VZORKŮ <i>i</i>	T _{1,i} [μs]	T _{2,i} [μs]	T _{3,i} [μs]	T _i [μs]	V _{1,i} [km/s]	V _{2,i} [km/s]	V _{3,i} [km/s]	V _i [km/s]	D _i [kg/m ³]	E _{CUi} [GPa]	R _{c,mraz,i} [MPa]
0	28	60,0	60,3	59,9	60,0	3,975	3,959	3,985	3,973	2172	34,29	-
	38	59,9	59,6	59,5	59,6	3,988	4,005	4,015	4,003	2170	34,78	-
	48	60,0	59,6	59,5	59,7	3,990	4,017	4,024	4,010	2171	34,91	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					59,8				3,995	2171	34,66	-
25	28	59,4	59,4	59,2	59,3	4,015	4,019	4,029	4,021	2172	35,12	-
	38	59,0	59,2	58,9	59,0	4,049	4,036	4,053	4,046	2177	35,64	-
	48	59,6	59,2	59,1	59,3	4,013	4,041	4,047	4,034	2178	35,44	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					59,2				4,033	2176	35,40	-
50	28	59,4	59,2	59,3	59,3	4,015	4,032	4,025	4,024	2177	35,25	-
	38	59,6	59,6	59,4	59,5	4,008	4,008	4,022	4,013	2182	35,14	-
	48	60,2	59,5	59,5	59,7	3,977	4,020	4,020	4,006	2182	35,02	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					59,5				4,014	2180	35,14	-
75	28	59,5	59,0	59,0	59,1	4,012	4,042	4,046	4,033	2180	35,46	
	38	59,8	59,8	58,9	59,5	3,992	3,995	4,056	4,014	2186	35,23	
	48	64,9	62,7	62,9	63,5	3,686	3,818	3,803	3,769	2188	31,07	
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					60,7				3,939	2185	33,92	-
100	28	61,7	60,5	59,9	60,7	3,869	3,945	3,985	3,933	2183	33,77	49,3
	38	62,5	61,6	61,0	61,7	3,822	3,875	3,916	3,871	2191	32,83	48,0
	48	84,0	82,0	85,0	83,7	2,848	2,917	2,814	2,860	2194	17,94	49,5
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					68,7				3,555	2189	28,18	48,9
- bez započítání hodnot vzorku č. 48:					61,2				3,902	2187	33,30	48,6
VIZUÁLNÍ POSOUZENÍ		cihla č. 48 po 100 zkušebních cyklech porušena – vznik trhlin na povrchu vzorku										

Tabulka 18 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – vzorky ze zkoušky mrazuvzdornosti na 125 zkušebních cyklů

POČET CYKLŮ <i>n</i>	OZN. <i>i</i>	T _{1,i} [μs]	T _{2,i} [μs]	T _{3,i} [μs]	T _i [μs]	V _{1,i} [km/s]	V _{2,i} [km/s]	V _{3,i} [km/s]	V _i [km/s]	D _i [kg/m ³]	E _{CUi} [GPa]	R _{c,mraz,i} [MPa]
0	11	59,9	60,0	59,8	59,9	3,997	3,990	4,003	3,997	2172	34,67	-
	15	59,0	59,4	60,1	59,5	4,051	4,027	3,980	4,019	2170	35,06	-
	29	59,6	59,0	59,3	59,3	4,013	4,054	4,037	4,035	2171	35,35	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					59,5				4,017	2171	35,04	-
25	11	59,3	59,5	59,1	59,3	4,037	4,024	4,047	4,036	2184	35,58	-
	15	58,4	58,8	59,3	58,8	4,092	4,068	4,034	4,065	2182	36,05	-
	29	59,0	58,7	58,6	58,8	4,054	4,075	4,082	4,070	2182	36,14	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					58,9				4,057	2183	35,93	-
50	11	59,9	59,9	59,8	59,9	3,993	3,993	4,003	3,997	2192	35,02	-
	15	58,5	58,6	58,9	58,7	4,089	4,078	4,058	4,075	2188	36,33	-
	29	58,9	58,6	59,0	58,8	4,061	4,085	4,058	4,068	2187	36,19	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					59,1				4,047	2189	35,85	-
75	11	60,7	60,6	60,5	60,6	3,944	3,947	3,957	3,949	2197	34,27	-
	15	59,4	59,4	59,6	59,4	4,024	4,027	4,013	4,021	2193	35,46	-
	29	58,5	58,6	58,5	58,5	4,089	4,085	4,089	4,088	2191	36,62	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					59,5				4,019	2194	35,45	-
100	11	66,5	67,4	70,3	68,0	3,600	3,552	3,405	3,519	2203	27,28	-
	15	61,2	62,5	62,9	62,2	3,905	3,827	3,800	3,844	2196	32,44	-
	29	58,8	58,8	59,6	59,1	4,068	4,068	4,013	4,050	2193	35,97	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					63,1				3,804	2197	31,90	-
125	11	118,5	115,9	117,0	117,1	2,019	2,064	2,044	2,043	2203	9,19	29,2
	15	63,7	65,0	64,7	64,5	3,752	3,680	3,694	3,709	2204	30,32	42,5
	29	59,6	59,6	59,8	59,7	4,013	4,013	4,000	4,009	2198	35,33	47,5
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					80,4				3,253	2202	24,95	39,7
- bez započítání hodnot vzorku č. 11					62,1				3,859	2201	32,82	45,0
VIZUÁLNÍ POSOUZENÍ		cihla č. 11 po 125 zkušebních cyklech porušena - vznik trhlin na povrchu vzorku										

Tabulka 19 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – vzorky ze zkoušky mrazuvzdornosti na 150 zkušebních cyklů

POČET CYKLŮ <i>n</i>	OZN. <i>i</i>	T _{1,i} [μs]	T _{2,i} [μs]	T _{3,i} [μs]	T _i [μs]	V _{1,i} [km/s]	V _{2,i} [km/s]	V _{3,i} [km/s]	V _i [km/s]	D _i [kg/m ³]	E _{CUi} [GPa]	R _{c,mraz,i} [MPa]
0	5	59,2	59,1	59,1	59,1	4,037	4,044	4,047	4,043	2172	35,51	-
	21	59,0	59,3	59,4	59,2	4,049	4,029	4,022	4,033	2170	35,31	-
	47	58,6	58,7	59,0	58,7	4,079	4,072	4,047	4,066	2171	35,89	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					59,0				4,047	2171	35,57	-
25	5	58,7	58,9	59,2	58,9	4,075	4,061	4,037	4,058	2180	35,90	-
	21	58,7	58,8	58,8	58,7	4,070	4,066	4,066	4,068	2186	36,18	-
	47	58,4	58,5	58,9	58,6	4,089	4,086	4,054	4,076	2198	36,53	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					58,7				4,067	2188	36,20	
50	5	58,9	58,8	59,3	59,0	4,061	4,065	4,034	4,053	2184	35,88	-
	21	58,4	58,6	58,5	58,5	4,091	4,080	4,087	4,086	2190	36,57	-
	47	58,2	58,4	58,6	58,4	4,107	4,093	4,079	4,093	2202	36,88	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					58,6				4,077	2192	36,44	-
75	5	58,6	58,9	59,2	58,9	4,078	4,058	4,037	4,058	2189	36,04	-
	21	58,9	58,9	58,9	58,9	4,056	4,059	4,059	4,058	2195	36,14	-
	47	58,2	58,3	58,7	58,4	4,103	4,096	4,068	4,089	2206	36,89	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					58,7				4,068	2197	36,36	-
100	5	59,0	59,3	60,4	59,5	4,054	4,030	3,960	4,015	2193	35,35	-
	21	60,8	60,8	60,6	60,7	3,929	3,929	3,942	3,934	2198	34,00	-
	47	60,2	59,9	61,4	60,5	3,967	3,987	3,889	3,948	2210	34,44	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					60,3				3,965	2200	34,60	-
125	5	60,3	60,9	63,5	61,5	3,967	3,928	3,764	3,886	2201	33,23	-
	21	61,7	60,9	62,2	61,6	3,875	3,926	3,844	3,882	2203	33,19	-
	47	61,4	60,5	63,8	61,9	3,889	3,950	3,743	3,861	2217	33,04	-
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					61,7				3,876	2207	33,15	-
150	5	73,9	75,4	186,2	111,8	3,234	3,170	1,284	2,562	2208	14,50	48,3
	21	73,5	72,4	77,5	74,4	3,253	3,300	3,085	3,212	2207	22,77	46,8
	47	150,9	124,1	-	137,5	1,583	1,924	-	1,753	2204	6,78	45,7
PRŮMĚRNÉ HODNOTY					107,9				2,509	2206	14,68	47,0
VIZUÁLNÍ POSOUZENÍ		všechny vzorky č. 5, 21 a 47 po 150 zkušebních cyklech porušeny - ulomeny rohy										

6.3 Diskuze k výsledkům experimentálních prací

V této části jsou shrnuty poznatky o vlivu a přímou závislostí působení střídavého účinku zmrazování a rozmrazování betonových cihel na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou v porovnání s výsledky destruktivního zkoušení.

6.3.1 Relativní dynamické moduly pružnosti a změny rychlostí šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulů pružnosti v tlaku a tahu v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů

Pro posouzení vlivu střídavých účinků zmrazování a rozmrazování na výsledky měření ultrazvukovou impulzovou metodou, byly vypočítány rozdíly mezi hodnotou sledovaného parametru srovnávacího tělesa, které nebylo vystaveno účinkům zmrazování-rozmrazování, a hodnotou parametru těles podrobených zkoušce mrazuvzdornosti v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů. Změny sledovaných parametrů jsou uváděny jako rozdíl v km/s (pro rychlost šíření ultrazvukového impulzu) a GPa (pro dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu), které jsou také vyjádřeny v procentech (kde je srovnávací hodnotou hodnota sledovaného zkušební vzorku před počátkem zkoušení na mrazuvzdornost).

Změny rychlosti šíření ultrazvukového impulzu a dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu byly vypočítány z následujících vztahů (18) a (19):

$$\Delta x_i = x_i - x_0 \quad (18)$$

$$\delta x_i = \frac{x_i - x_0}{x_0} \quad (19)$$

kde

$\Delta x (\Delta V_i; \Delta E_i)$	změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu i-tého vzorku při n-tém zmrazovacím cyklu [km/s], změna dynamického modulu pružnosti i-tého vzorku při n-tém zmrazovacím cyklu [GPa],
$x_i (V_i; E_{cu,i})$	rychlost šíření ultrazvukového impulzu i-tého vzorku po n-tém zmrazovacím cyklu [km/s]; dynamický modul pružnosti i-tého vzorku po n-tém zmrazovacím cyklu [GPa],
$x_0 (V_{0,i}; E_{cu,0,i})$	rychlost šíření ultrazvukového impulzu vzorkem před počátkem zmrazování [km/s], dynamický modul pružnosti před počátkem zmrazování [GPa],
$\delta x (\delta V_i; \delta E_{cu,i})$	procentuální změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu [%], procentuální změna dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu [%].

Hodnoty rozdílů Δx jsou zaokrouhleny s přesností na 0,001 km/s (0,01 GPa). Výsledky δx jsou uváděny s přesností na 0,1 %.

V tabulkách 18 - 20 jsou uvedeny rozdíly rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a dynamických modulů pružnosti pro vzorky jednotlivých sad po příslušných zmrazovacích etapách a hodnoty relativních dynamických modulů pružnosti $RDM_{UPPT,i}$.

Ve všech těchto tabulkách (18, 19, 20, 22) jsou uvedeny i hodnoty naměřené na poškozených vzorcích, případně z těchto hodnot vypočítané další charakteristiky, které jsou psané kurzívou.

Tabulka 20 - Relativní dynamické moduly pružnosti a změny rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a dynamických modulů pružnosti v tahu a tlaku v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů – sada 1 až sada 3

SADA Č.	POČET CYKLŮ n	$RDM_{UPPT,i}$ [%]	ΔV_i [km/s]	δV_i [%]	$\Delta E_{CU,i}$ [GPa]	$\delta E_{CU,i}$ [%]
1	25	102,71	0,054	1,3	1,04	3,0
		103,11	0,061	1,5	1,16	3,5
		101,01	0,020	0,5	0,53	1,5
2	25	101,57	0,031	0,8	0,65	1,9
		101,87	0,037	0,9	0,81	2,3
		100,45	0,009	0,2	0,42	1,2
	50	101,69	0,034	0,8	0,78	2,3
		101,87	0,037	0,9	0,90	2,6
		94,13	-0,120	-3,0	-1,73	-4,9
3	25	100,68	0,014	0,3	0,35	1,0
		101,14	0,023	0,6	0,61	1,7
		101,00	0,021	0,5	0,51	1,5
	50	99,66	-0,007	-0,2	0,09	0,2
		98,71	-0,026	-0,6	-0,16	-0,5
		100,68	0,014	0,3	0,46	1,3
	75	94,93	-0,103	-2,6	-1,49	-4,3
		84,88	-0,314	-7,8	-4,97	-13,9
		99,10	-0,018	-0,4	0,00	0,0

Tabulka 21 - Relativní dynamické moduly pružnosti a změny rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a dynamických modulů pružnosti v tlaku a tahu a v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů – sada 4 pro 100 zmrazovacích cyklů

POČET CYKLŮ n	$RDM_{UPPT,i}$ [%]	ΔV_i [km/s]	δV_i [%]	$\Delta E_{CU,i}$ [GPa]	$\delta E_{CU,i}$ [%]
25	102,43	0,048	1,2	0,83	2,4
	102,16	0,043	1,1	0,86	2,5
	101,18	0,024	0,6	0,53	1,5
50	102,60	0,048	1,2	0,83	2,4
	100,50	0,043	1,1	0,86	2,5
	99,78	0,024	0,6	0,53	1,5
75	103,07	0,051	1,3	0,96	2,8
	100,56	0,010	0,3	0,37	1,1
	88,29	-0,004	-0,1	0,11	0,3
100	98,98	-0,040	-1,0	-0,52	-1,5
	93,51	-0,132	-3,3	-1,95	-5,6
	50,83	-1,151	-28,7	-16,97	-48,6

Tabulka 22 - Relativní dynamické moduly pružnosti a změny rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a dynamických modulů pružnosti v tlaku a tahu v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů – sada 5 pro 125 zmrazovacích cyklů

POČET CYKLŮ n	$RDM_{UPPT,i}$ [%]	ΔV_i [km/s]	δV_i [%]	$\Delta E_{CU,i}$ [GPa]	$\delta E_{CU,i}$ [%]
25	101,98	0,039	1,0	0,88	2,6
	102,28	0,045	1,1	0,99	2,8
	101,77	0,035	0,9	0,80	2,3
50	100,00	0,000	0,0	0,32	0,9
	102,80	0,056	1,4	1,27	3,6
	101,65	0,033	0,8	0,84	2,4
75	97,65	-0,047	-1,2	-0,43	-1,2
	100,11	0,002	0,1	0,40	1,1
	102,64	0,053	1,3	1,27	3,6
100	77,43	-0,478	-12,0	-7,42	-21,4
	91,55	-0,175	-4,4	-2,62	-7,5
	100,73	0,015	0,4	0,62	1,8
125	26,12	-1,954	-48,9	-25,51	-73,5
	85,13	-0,311	-7,7	-4,74	-13,5
	98,72	-0,026	-0,6	-0,02	-0,1

Tabulka 23 - Relativní dynamické moduly pružnosti, změny rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a dynamických modulů pružnosti v tlaku a tahu v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů – sada 6 pro 150 zmrazovacích cyklů

POČET CYKLŮ n	$RDM_{UPPT,i}$ [%]	ΔV_i [km/s]	δV_i [%]	$\Delta E_{CU,i}$ [GPa]	$\delta E_{CU,i}$ [%]
25	100,7	0,015	0,4	0,40	1,1
	101,7	0,034	0,9	0,87	2,5
	100,5	0,010	0,3	0,64	1,8
50	100,5	0,010	0,3	0,38	1,1
	102,6	0,053	1,3	1,26	3,6
	101,3	0,027	0,7	0,99	2,8
75	100,7	0,015	0,4	0,54	1,5
	101,2	0,025	0,6	0,84	2,4
	101,1	0,023	0,6	1,00	2,8
100	98,6	-0,028	-0,7	-0,16	-0,4
	95,1	-0,100	-2,5	-1,30	-3,7
	94,2	-0,118	-2,9	-1,45	-4,1
125	92,3	-0,157	-3,9	-2,27	-6,4
	92,6	-0,152	-3,8	-2,12	-6,0
	90,1	-0,205	-5,0	-2,85	-7,9
150	27,9	-1,480	-36,6	-21,01	-59,2
	63,3	-0,821	-20,4	-12,54	-35,5
	18,2	-2,312	-56,9	-29,11	-81,1

6.3.2 Vyhodnocení výsledků měření ultrazvukovou impulzovou metodou a součinitelů mrazuvzdornosti

V následující tabulce 22 jsou pro jednotlivé zmrazovací etapy příslušných sad vzorků uvedeny průměrné hodnoty relativních modulů pružnosti, procentuálních změn rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a hodnot dynamických modulů pružnosti v tahu a tlaku.

Dále jsou v tabulce 22 uvedeny hodnoty součinitelů mrazuvzdornosti pro zmrazovací etapy jednotlivých sad vzorků vycházející z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu K_V naměřeného na vzorcích po ukončení zmrazovací etapy a před zahájením zmrazovací etapy. Stejně tak jsou zde stanoveny i součinitele mrazuvzdornosti vycházející z dynamických modulů pružnosti v tahu a tlaku K_{CU} .

V posledních dvou sloupcích tabulky 22 jsou uvedeny hodnoty součinitelů mrazuvzdornosti K_1 a K_2 (viz kap. 6.1.3), vycházející z pevností v tlaku vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti, zkoušených po ukončení příslušné zmrazovací etapy, z pevností v tlaku vzorků srovnávacích, zkoušených před zahájením zmrazování a z pevnosti v tlaku vzorků srovnávacích, zkoušených na konci příslušné zmrazovací etapy.

Tabulka 24 – Relativní dynamické moduly pružnosti, změny rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a dynamických modulů pružností v tahu a tlaku v závislosti na n zmrazovacích cyklech

SADA Č.	POČET CYKLŮ n	$RDM_{UPPT,n}$ [%]	ΔV_n [%]	$\Delta E_{CU,n}$ [%]	$K_{V,n}$ [%]	$K_{E,n}$ [%]	$K_{1,n}$ [%]	$K_{2,n}$ [%]
1	25	102,28	0,1	2,7	101,1	102,7	106,5	101,1
2	25	101,30	0,7	1,8	99,6	99,6	104,7	97,3
	50	99,23	-0,4	0,0				
3	25	100,95	0,5	1,4	96,4	93,9	100,6	91,5
	50	99,69	-0,2	0,4				
	75	92,97	-3,6	-6,1				
4	25	101,92	1,0	2,2	88,1 97,9	79,6 96,4	103,6 103,0	93,7 92,6
	50	100,96	1,0	1,4				
	75	97,31	0,5	-2,1				
	100	80,77 95,75	-11,0 -2,1	-18,6 -1,2				
5	25	102,01	1,0	2,5	81,0 95,8	71,2 93,2	82,4 93,3	78,8 90,9
	50	101,49	0,7	2,3				
	75	100,13	0,1	1,2				
	100	89,87	-5,3	-9,0				
	125	69,99 91,93	-19,1 -4,2	-29,0 -2,4				
6	25	100,99	0,5	1,8	62,0 95,8	41,3 93,2	92,4	90,8
	50	101,49	0,7	2,5				
	75	101,04	0,5	2,2				
	100	95,99	-2,0	-2,7				
	125	91,66	-4,2	-6,8				
	150	36,51	-38,0	-58,6				

Poznámka 1: V buňkách se dvěma hodnotami - horní, psané kurzívou spočítány s hodnotami porušených vzorků, spodní spočítány bez porušeného vzorku. U sady č. 6 však vzhledem k poškození všech vzorků, spodní hodnoty uvedeny po 125 zmrazovacích cyklech.

6.3.3 Zhodnocení výsledků experimentálních prací

Měření byla prováděna na betonových, vibrolisovaných cihlách lícových formátu 240 x 115 x 70 mm nasycených vodou. Dle výrobce je mrazuvzdornost zkoušena na 50 zkušebních cyklů postupem dle ČSN 73 1322 (viz kap. 5.1.2).

V rámci práce byla mrazuvzdornost cihel zjišťována nejen po výrobcem deklarovaných 50 zmrazovacích cyklech, ale i po 25, 75, 100, 125 a 150 cyklech – pro uvedený počet cyklů byla vždy zkoušena samostatná sada vzorků.

Pro zjištění změn struktury betonových prvků v průběhu zmrazování a jejich hodnocení odolnosti vůči mrazu, byla měřena doba průchodu ultrazvukového impulzu a stanovena objemová hmotnost, ze kterých byly vypočítány další charakteristiky pro hodnocení mrazuvzdornosti cihel, konkrétně: rychlost šíření ultrazvukového impulzu, relativní dynamický modul pružnosti a dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu.

Pevnost v tlaku, pro stanovení součinitele mrazuvzdornosti (K_1 dle ČSN 73 1322 a nenormového K_2), byla vypočítána z destruktivního zkoušení pevnosti v tlaku vzorků, pro každou sadu vystavenou příslušnému počtu zkušebních cyklů.

Pro hodnocení mrazuvzdornosti cihel na základě měření ultrazvukovou impulzovou metodou, byly vypočítány součinitele mrazuvzdornosti ze změny rychlosti šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulů pružností v tlaku a tahu.

V tabulkách 21 - 24 jsou uvedeny i hodnoty naměřené na vizuálně poškozených vzorcích a z nich vypočítané charakteristiky. Vzhledem však k požadavku dle ČSN 73 1322 byly tyto vzorky vyloučeny a nezahrnovaly se do celkového hodnocení.

Na základě analýzy výsledků z experimentálních prací jsou v následujících kapitolách uvedeny a zhodnoceny poznatky o využití ultrazvukové impulzové metody pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel.

Rychlost šíření ultrazvukového impulzu, dynamický modul pružnosti a pevnost v tlaku vzorků

Teoreticky by se zvyšujícím se počtem zmrazovacích cyklů mělo docházet ke změnám (porušení) vnitřní struktury betonu, která se následně projeví snížením hodnot parametrů z nedestruktivního zkoušení. Avšak tento předpoklad se u vzorků zkoušených na mrazuvzdornost potvrdil až po 50 zmrazovacích cyklech.

Na základě analýzy výsledků ultrazvukovou impulsovou metodou (rychlost šíření ultrazvukového impulzu, dynamických modulů pružností v tlaku a tahu) a destruktivních zkoušek pevnosti v tlaku bylo zjištěno:

a) Parametry z nedestruktivního zkoušení ultrazvukovou impulzovou metodou**▪ 0 – 25 zmrazovacích cyklů:**

Došlo k nárůstu hodnot rychlostí šíření ultrazvukových impulzů a dynamických modulů pružností v tlaku a tahu.

- *Rychlost šíření ultrazvukového impulzu:*

a) *Vzorky podrobené zkoušce mrazuvzdornosti (sada C):* Hodnoty se mírně zvyšují od hodnoty 4,018 km/s do 4,049 km/s.

b) *Srovnávací tělesa zkoušená po ukončení stanoveného počtu zmrazovacích cyklů (sada B):* Hodnoty se se stářím vzorků zvyšují od 4,037 km/s do 4,045 km/s.

- *Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu:*

a) *Vzorky podrobené zkoušce mrazuvzdornosti (sada C):* Hodnoty se zvyšují v rozsahu od 33,19 GPa do 36,44 GPa.

b) *Srovnávací tělesa zkoušená po ukončení stanoveného počtu zmrazovacích cyklů (sada B) - se stářím vzorků se hodnoty zvyšují od 35,03 GPa do 36,17 GPa.*

▪ od 50 zmrazovacích cyklů do konce zkoušky:

Hodnoty rychlostí ultrazvukových impulzů a dynamických modulů pružností v tahu a tlaku vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti poklesly, u srovnávacích vzorků se tyto hodnoty s jejich stářím zvyšují.

- *Rychlost šíření ultrazvukového impulzu:*

a) *Vzorky podrobené zkoušce mrazuvzdornosti (sada C):* Hodnoty klesají od 4,077 km/s do 3,859 km/s (až do 2,509 km/s po 150 zkušebních cyklech u vizuálně porušených vzorků).

b) *Srovnávací tělesa zkoušená po ukončení stanoveného počtu zmrazovacích cyklů (sada B):* Naměřené hodnoty se zvyšují do 4,174 km/s.

- *Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku:*

a) *Vzorky podrobené zkoušce mrazuvzdornosti (sada C):* Hodnoty klesají v rozsahu od 34,83 GPa do 32,82 GPa (u porušených vzorků po 150 zkušebních cyklech pokles až na 14,68 GPa).

b) *Srovnávací tělesa zkoušená po ukončení stanoveného počtu zmrazovacích cyklů (sada B):* Hodnoty dále rostou do 38,31 GPa.

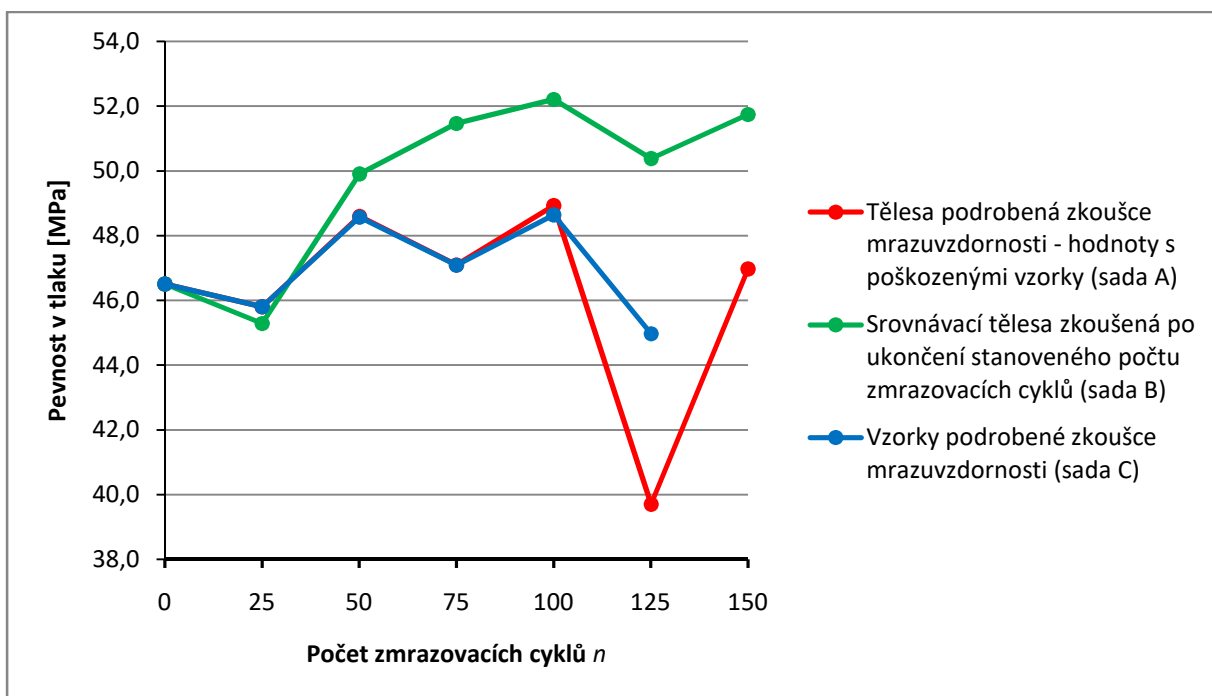
b) Parametry z destruktivního zkoušení

▪ pevnost v tlaku:

a) *Srovnávací tělesa zkoušená před zahájením zmrazování (sada A):* Nabývají hodnot v rozsahu od 43,0 MPa do 50,8 MPa, kdy jejich průměrná hodnota je 46,5 MPa.

b) *Srovnávací tělesa zkoušená po ukončení stanoveného počtu zmrazovacích cyklů (sada B):* Hodnoty se s jejich stářím zvyšují od 45,3 MPa do 52,2 MPa.

Průběh pevností vzorků v závislosti na zvyšujícím se počtu zmrazovacích cyklů nebo jejich stáří je znázorněn v následujícím grafu 1:



Graf 1: Graf závislosti pevnosti v tlaku vzorků na počtu zmrazovacích cyklů nebo jejich stáří

c) Dílčí zhodnocení

U *srovnávacích těles zkoušených po ukončení stanoveného počtu zmrazovacích cyklů* dochází v celém průběhu trvání zkoušky k nárůstu hodnot rychlostí ultrazvukového impulsu, dynamických modulů pružnosti a pevností v tlaku, v důsledku delší doby hydratace cementu betonových cihel uložených ve vodě.

U *těles podrobených zkoušce mrazuvzdornosti* dochází k mírnému zvyšování (do cca 25 cyklů) hodnot rychlostí šíření ultrazvukového impulsu, dynamických modulů pružnosti v tlaku a tahu a pevností v tlaku, což je způsobeno i přes účinky zmrazování a rozmrazování hydratací cementu a tím zvyšování těchto hodnot.

S dalším zvyšujícím se počtem zmrazovacích cyklů (od 50 cyklů výše) dochází k porušení vnitřní struktury betonových cihel, což se následně projevuje na poklesu hodnot rychlostí šíření ultrazvukových impulzů, dynamických modulů pružnosti i pevností v tlaku (viz graf 1).

U vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti nedochází i přes jejich značné, viditelné poškození k výraznému poklesu pevností (např. vzorky č. 5, 21, 47 po 150 cyklech vykazují průměrnou pevnost v tlaku 47,0 MPa). Výjimkou je jediný vzorek č. 11, zkoušený po 125 zmrazovacích cyklech, s výrazně nižší výslednou pevností v tlaku, která je 29,2 MPa.

Relativní dynamický modul pružnosti a součinitel mrazuvzdornosti

Dle ustanovení ČSN 73 1322 [10] se mrazuvzdornost betonu hodnotí součinitelem mrazuvzdornosti z pevností v tahu za ohybu srovnávacích vzorků (zkoušeny před zahájením zmrazování) a vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti, zkoušených po stanoveném počtu zkušebních cyklů. Vzhledem k tomu, že u betonových zdících prvků se zkouší pevnost v tlaku, je součinitel mrazuvzdornosti vypočítán z pevností stanovených na základě této zkoušky (výpočet viz kapitola 6.1.3). Beton je považován za mrazuvzdorný, je-li součinitel mrazuvzdornosti větší nebo roven 75 %.

Beton je materiál, který zejména při uložení ve vodním prostředí zvyšuje svoji pevnost, proto byl vypočítán i součinitel mrazuvzdornosti K_2 (výpočet viz kapitola 6.1.3) ze srovnávacích těles zkoušených po ukončení stanoveného počtu zmrazovacích cyklů.

Norma ČSN 73 1322 [10] uvažuje i s využitím nedestruktivních metod (ultrazvukové impulzové a rezonanční metody), avšak není v ní uveden parametr pro hodnocení mrazuvzdornosti. Proto byl pro hodnocení mrazuvzdornosti betonu vypočítán součinitel mrazuvzdornosti jednak z rychlosti šíření ultrazvukového impulzu K_V (výpočet viz kapitola 6.1.3) a z dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu (výpočet viz kapitola 6.1.3), stanovený na základě měření ultrazvukovou impulzovou metodou.

Výhodou nedestruktivního zkoušení při hodnocení mrazuvzdornosti betonu je, že měření se provádí na jednom a téže vzorku, tj. parametr se změří na vzorku před zahájením zkoušky mrazuvzdornosti a potom se měří průběžně po požadovaném počtu zkušebních cyklů.

Pro hodnocení mrazuvzdornosti betonu lze využít i postup uvedený v normě ČSN 73 1380 [21], podle které se zjišťuje porušení vnitřní struktury na základě hodnot relativních dynamických modulů pružnosti. Avšak i v tomto případě nejsou pro betony uvedeny konkrétní kritéria pro zhodnocení, zda je beton mrazuvzdorný či ne.

Pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel, na základě ultrazvukové impulzové metody, byly v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů pro každou zmrazovací etapu

stanoveny relativní dynamické moduly pružnosti, součinitelé mrazuvzdornosti vycházející z rychlostí šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulů pružnosti v tahu a tlaku a pro porovnání i součinitelé mrazuvzdornosti vycházející z pevností v tlaku stanovené destruktivně.

Pro zhodnocení relevantnosti využití jednotlivých výše uvedených parametrů k hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel, bylo provedeno jejich porovnání pro každý počet zkušebních cyklů, a to ve třech úrovních, konkrétně:

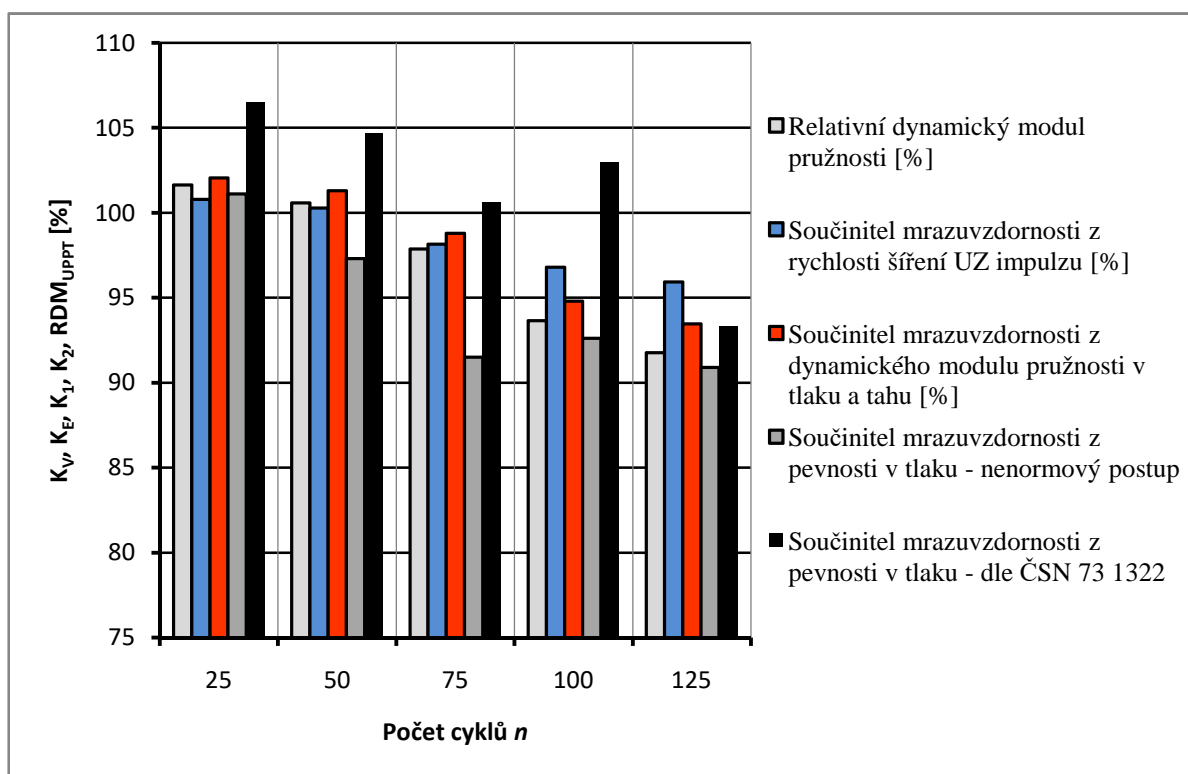
1.) Byl vypočítán aritmetický průměr, výběrová směrodatná odchylka a variační koeficient ze souboru všech typů součinitelů mrazuvzdornosti (K_1 , K_2 , K_E , K_V) a relativní dynamický modul pružnosti RDM_{UPPT} pro daný počet zkušebních cyklů, viz tabulka 25 (do hodnocených souborů nebyly zahrnuty vizuálně zřejmé poškozené vzorky). V grafu 2 je pak znázorněno porovnání sledovaných veličin.

2.) Byl vypočítán aritmetický průměr ze souboru typů součinitelů mrazuvzdornosti (K_E , K_V) a relativní dynamický modul pružnosti RDM_{UPPT} pro daný počet zkušebních cyklů. Dále byl stanoven rozdíl mezi koeficientem mrazuvzdornosti K_2 , stanoveným z pevnosti v tlaku srovnávacích těles zkoušených po ukončení stanoveného počtu zmrazovacích cyklů, a průměrnou hodnotou z ostatních parametrů, viz tabulka 26 (do hodnocených souborů nebyly zahrnuty vizuálně zřejmé poškozené vzorky).

3.) Byl vypočítán aritmetický průměr, výběrová směrodatná odchylka a variační koeficient ze souboru typů součinitelů mrazuvzdornosti z měření ultrazvukovou impulzovou metodou a relativních dynamických modulů pružnosti RDM_{UPPT} pro daný počet zkušebních cyklů. Dále byl stanoven rozdíl mezi koeficientem mrazuvzdornosti K_1 , stanoveným normovým postupem z pevnosti v tlaku, a průměrnou hodnotou z ostatních parametrů, viz tabulka 27 (do hodnocených souborů nebyly zahrnuty vizuálně zřejmé poškozené vzorky).

Tabulka 25 - Charakteristiky mrazuvzdornosti z destruktivního i nedestruktivního zkoušení, jejich průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační součinitelé

POČET CYKLŮ	$RDM_{UPPT,n}$ [%]	K_V [%]	K_E [%]	K_1 [%]	K_2 [%]	σK_i [%]	s_x [%]	VAR [%]
25	101,6	100,8	102,1	106,5	101,1	102,4	2,1	2,0
50	100,6	100,3	101,3	104,7	97,3	100,8	2,4	2,3
75	97,9	98,1	98,8	100,6	91,5	97,4	3,1	3,2
100	93,6	96,8	94,8	103,0	92,6	96,2	3,7	3,8
125	91,8	95,9	93,4	93,3	90,9	93,1	1,7	1,8
PRŮMĚRNÁ HODNOTA								2,6



Graf 2: Grafické porovnání relativního dynamického modulu pružnosti RDM_{UPPT} a součinitelů mrazuvzdornosti K_1 , K_2 , K_E a K_V v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů.

Tabulka 26 - Porovnání charakteristik mrazuvzdornosti z nedestruktivního zkoušení se součinitelem mrazuvzdornosti stanoveným ze srovnávacích vzorků zkoušených po ukončení stanoveného počtu zmrazovacích cyklů

POČET CYKLŮ	RDM_{UPPT} [%]	K_V [%]	K_E [%]	$\emptyset K$ [%]	K_2 [%]	$K_2 - \emptyset K$ [%]
25	101,6	100,8	102,1	101,5	101,1	-0,4
50	100,6	100,3	101,3	100,7	97,3	-3,4
75	97,9	98,1	98,8	98,3	91,5	-6,8
100	93,6	96,8	94,8	95,1	92,6	-2,5
125	91,8	95,9	93,4	93,7	90,9	-2,8

Tabulka 27 - Porovnání charakteristik mrazuvzdornosti z nedestruktivního zkoušení se součinitelem mrazuvzdornosti stanoveným dle ČSN 73 1322

POČET CYKLŮ	RDM_{UPPT} [%]	K_V [%]	K_E [%]	$\emptyset K$ [%]	s_x [%]	VAR [%]	$K_1 - \emptyset K$ [%]
25	101,6	100,8	102,1	101,5	0,5	0,5	5,0
50	100,6	100,3	101,3	100,7	0,4	0,4	4,0
75	97,9	98,1	98,8	98,3	0,4	0,4	2,3
100	93,6	96,8	94,8	95,1	1,3	1,4	7,9
125	91,8	95,9	93,4	93,7	1,7	1,8	-0,4
PRŮMĚRNÁ HODNOTA						0,9	

Dílčí závěry

Ze zhodnocení porovnání součinitelů mrazuvzdornosti a dynamického modulu pružnosti vyplynulo:

- Nejvyšších hodnot dosahuje součinitel mrazuvzdornosti K_1 , vypočítaný normovým postupem z pevnosti v tlaku, u vzorků zkoušených na 25 až 100 cyklů (106,5 % až 100,6 %). Pouze po 125 zkušebních cyklech je nižší než součinitele mrazuvzdornosti (K_V , K_E) vypočítané z parametrů nedestruktivního zkoušení.
- Variační koeficient celého souboru parametrů, využitých pro hodnocení mrazuvzdornosti, je v průměru 2,6%. Z praktického hlediska lze hodnotit jednotlivé parametry za srovnatelné a využitelné pro hodnocení mrazuvzdornosti.
- Součinitel mrazuvzdornosti K_2 , vypočítaný s využitím pevností v tlaku srovnávacích vzorků zkoušených po ukončení daného počtu zmrazovacích cyklů, se pohybuje v rozmezí 101,1 % až 90,9 %, a je v průměru o cca 7 % nižší než součinitel mrazuvzdornosti K_1 vypočítaný normovým postupem.
- Součinitel mrazuvzdornosti K_2 , vypočítaný s využitím pevností v tlaku srovnávacích vzorků zkoušených po ukončení daného počtu zmrazovacích cyklů, je v průměru o 3,2 % nižší než průměrná hodnota z relativních modulů pružnosti a součinitelů mrazuvzdornosti vypočítaných z parametrů ultrazvukového měření.
- Relativní dynamický modul pružnosti a součinitele mrazuvzdornosti, vypočítané z měření ultrazvukovou impulzovou metodou, se liší nevýznamně - průměrný variační koeficient ze souboru jejich hodnot je 0,9 %. Součinitel mrazuvzdornosti K_1 (normový postup) je pro 25 až 100 zkušebních cyklů vyšší o 2,3 % až 7,9 %. Pouze po 125 zkušebních cyklech jsou parametry z měření ultrazvukovou impulzovou metodou vyšší o 0,4 %.

6.3.4 Dosažené poznatky

Na základě analýzy výsledků experimentálních prací lze konstatovat:

- Parametry z měření ultrazvukovou impulzovou metodou při zkoušce mrazuvzdornosti betonových cihel korelují se změnami v jejich vnitřní struktuře.
- Rozdíly mezi jednotlivými parametry betonových cihel z měření ultrazvukovou impulzovou metodou jsou minimální (variační koeficient je 0,9 %) a proto kterýkoliv

z těchto parametrů (součinitelé mrazuvzdornosti K_V , K_E a relativní modul pružnosti RDM_{UPPT}) lze využít pro hodnocení jejich mrazuvzdornosti.

- Tyto parametry, z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, jsou v těsné korelaci i se součiniteli mrazuvzdornosti vypočítaných z pevností v tlaku.
- Součinitel mrazuvzdornosti, vypočítaný s využitím pevností v tlaku srovnávacích vzorků zkoušených po ukončení daného počtu zmrazovacích cyklů, je nižší než průměrná hodnota z relativních modulů pružnosti a součinitelů mrazuvzdornosti, vypočítaných z dynamického modulu pružnosti a rychlosti šíření ultrazvukového impulsu.
- Zkoušené betonové cihly splňují s vysokou rezervou deklarovanou hodnotu mrazuvzdornosti stanovenou výrobcem, která je 50 zkušebních cyklů.
- Nejvyšších hodnot dosahuje součinitel mrazuvzdornosti vypočítaný normovým postupem (dle ČSN 73 1322, pevnost v tlaku srovnávacích vzorků se zjišťuje v termínu zahájení zkoušky mrazuvzdornosti). Je otázkou, zda normou požadovaná hodnota součinitele mrazuvzdornosti, je v případě jeho stanovení z pevností v tlaku při deklarovaném počtu zmrazovacích cyklů, relevantní.
- Bylo zjištěno, že u těles podrobených zkoušce mrazuvzdornosti, dochází k mírnému zvyšování (do cca 25 cyklů) hodnot pevností v tlaku, ale i rychlostí šíření ultrazvukového impulsu, dynamických modulů pružnosti, což lze vysvětlit nárůstem pevností, ke kterým dochází i přes účinky zmrazování a rozmrazování. *Pro ilustraci je uveden součinitel mrazuvzdornosti pro cihly po zkoušce na 150 cyklů, které sice vykazovaly zjevné porušení, což se projevilo i na parametrech z nedestruktivního zkoušení, ale součinitel mrazuvzdornosti z pevností v tlaku byl i přes to vysoký – konkrétně 92,4 % (viz tabulka 24).*
- Hodnota součinitele mrazuvzdornosti K_2 , vypočítaného s využitím pevností v tlaku srovnávacích vzorků zkoušených po ukončení daného počtu zmrazovacích cyklů, je průměru o cca 7 % nižší než součinitel mrazuvzdornosti vypočítaný normovým postupem K_1 , ale i v tomto případě jsou jeho hodnoty vyhovující.

Závěr

Náplní bakalářské práce bylo ověřit využitelnost ultrazvukové impulzové metody pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel.

Pro zkoušky byly použity vibrolisované, betonové cihly lícové formátu 240 x 115 x 70 mm. Měření byla prováděna na srovnávacích vzorcích a na vzorcích podrobených zkoušce mrazuvzdornosti. Cihly byly zkoušeny na 50 zmrazovacích cyklů (deklarovaná hodnota výrobcem) a na 25, 75, 125 a 150 cyklů.

V teoretické části byla provedena rešerše odborné literatury se zaměřením na faktory, které ovlivňují mrazuvzdornost betonu a rešerše norem zabývajících se zkouškami mrazuvzdornosti betonu a dalších stavebních materiálů destruktivním i nedestruktivním způsobem zkoušení a jejich vyhodnocením.

V rámci experimentální části byla provedena měření ultrazvukovou impulzovou metodou a destruktivní zkoušky pro stanovení pevností v tlaku a objemových hmotností betonových cihel, pro zhodnocení a porovnání postupů mrazuvzdornosti.

Mrazuvzdornost byla hodnocena jednak s využitím normového postupu - byl stanoven součinitel mrazuvzdornosti z destruktivních zkoušek pevnosti v tlaku cihel (srovnávacích těles zkoušených před zahájením zmrazování a těles po ukončení daného počtu zmrazovacích cyklů). Kromě normového postupu byla mrazuvzdornost hodnocena na základě součinitelů vypočítaných z pevností v tlaku srovnávacích cihel zkoušených po ukončení stanoveného počtu zkušebních cyklů.

Při měření ultrazvukovou impulzovou metodou byla mrazuvzdornost betonových cihel hodnocena na základě změn rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu postupem dle ČSN 73 1371 [20] a na základě změn relativního dynamického modulu pružnosti postupem dle ČSN 73 1380 [21]. Výhodou nedestruktivního zkoušení při hodnocení mrazuvzdornosti betonu je, že měření se provádí na jednom a téže vzorku, tj. parametr se změří na vzorku před zahájením zkoušky mrazuvzdornosti a potom se měří průběžně po požadovaném počtu zkušebních cyklů.

V případě parametrů z nedestruktivního zkoušení norma neuvádí parametr, podle kterého se mrazuvzdornost hodnotí, proto byl pro hodnocení a možnost porovnání jednotlivých postupů využit součinitel mrazuvzdornosti vypočítaný z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu, resp. z dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu.

Z provedeného porovnání vyplývá, že změny součinitelů mrazuvzdornosti z nedestruktivního zkoušení a hodnoty relativních modulů pružnosti se od sebe liší minimálně (do 0,9 %) a z praktického hlediska lze pro hodnocení mrazuvzdornosti využít jakýkoliv z těchto parametrů. Tyto parametry jsou v těsné korelaci i se součinitelem

mrazuvzdornosti vypočítaného z pevností v tlaku i v případě, že jako srovnávací hodnoty jsou použity hodnoty pevností v tlaku stanovené po ukončení daného počtu zkušebních cyklů.

Byla prokázána bezproblémová využitelnost ultrazvukové impulsové metody pro hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel. Jako hodnotící kritérium pro určení, zda zkoušený výrobek je mrazuvzdorný či ne, lze využít hodnotu součinitele mrazuvzdornosti uvedenou v ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu.

Předložená bakalářská práce splnila stanovené cíle. V práci jsou uvedeny prakticky využitelné poznatky pro využívání ultrazvukové impulzové metody při hodnocení mrazuvzdornosti betonových cihel.

Seznam použité literatury

- [1] GALAN, Andrej. *Kombinované ultrazvukové metody skúšania betónu: vysokoškolská príručka pre stavebné fakulty vysokých škôl*. 1.vyd. Bratislava: VEDA, Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1984.
- [2] HOBST, Leonard, Jiří ADÁMEK, Petr CIKRLE, Pavel SCHMID. *Diagnostika stavebních konstrukcí: Přednášky*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005.
- [3] HELA, Rudolf. *Technologie stavebních dílců*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. ISBN 80-214-1991-1.
- [4] HELA, Rudolf. *Technologie betonu: Modul M01, Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005.
- [5] ADÁMEK, Jiří, NOVOTNÝ, Bohumil, KOUKAL, Jan. *Stavební materiály*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1997. ISBN 80-214-0631-3.
- [6] NOVÁK, Jaroslav a kolektiv. *Nauka o materiálech 10, Stavební materiály I*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN.
- [7] MALHOTRA, V. M. a Nicholas J. CARINO. *Handbook on nondestructive testing of concrete*. 2nd ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2004. ISBN 08-031-2099-0.
- [8] OBRAZ, Jaroslav. *Zkoušení materiálu ultrazvukem: celostátní vysokoškolská příručka pro skupinu studijních oborů Strojnictví a ostatní kovodělná výroba*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [9] ČSN EN 771-3 ed. 2 (72 2634). *Specifikace zdících prvků – Část 3: Betonové tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem*. Praha: Český normalizační institut, 2011, 40 stran.
- [10] ČSN 73 1322 *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Praha: Český normalizační institut, 1969, 6 stran.
- [11] ČSN EN 15304 *Stanovení odolnosti autoklávovaného pórobetonu proti zmrazování a rozmrazování*. Praha: Český normalizační institut, 2010, 20 stran.
- [12] ČSN EN 772-18 *Zkušební metody pro zdící prvky – Část 18: Stanovení mrazuvzdornosti vápenopískových zdících prvků*. Praha: Český normalizační institut, 2011, 8 stran.
- [13] ČSN 72 2601/Z3 *Skúšanie tehliarskych výrobkov – Spoločné ustanovenia*, 2000, 4 strany.

-
- [14] ČSN P CEN/TS 772-22 *Zkušební metody pro zdící prvky – Část 22: Stanovení mrazuvzdornosti pálených zdících prvků*, Praha: Český normalizační institut, 2006, 16 stran.
- [15] ČSN EN 12371 *Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení mrazuvzdornosti*, Praha: Český normalizační institut, 2002, 16 stran.
- [16] ČSN 72 2452 *Zkouška mrazuvzdornosti malty*, Praha: Český normalizační institut, 1970, 4 strany.
- [17] MARTINČEK, Gustáv. *Nedeštruktívne dynamicke metódy skúšania stavebných materiálov a konštrukcií*. Bratislava: VSAV, 1962.
- [18] PAVLÍK, Adolf, DOLEŽEL, Jaroslav. *Nedestruktivní vyšetřování betonových konstrukcí*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1977.
- [19] ČSN EN 12504-4 *Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Praha: Český normalizační institut, 2004, 16 stran.
- [20] ČSN 73 1371 *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2011, 12 stran.
- [21] ČSN 73 1380 *Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – Porušení vnitřní struktury*. Praha: Český normalizační institut, 2007, 32 stran.
- [22] ČSN 73 1372 *Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2012, 16 stran.
- [23] ČSN EN 14146 *Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení dynamického modulu pružnosti (pomocí základní rezonanční frekvence)*. Praha: Český normalizační institut, 2005, 16 stran.
- [24] BECHYNĚ, Stanislav: *Stavatelství betonové – 1, Technologie betonu, svazek pátý, vodotěsnost a jiné stavební a fyzikální vlastnosti betonu*. SNTL, Praha 1961.
- [25] ČSN EN 772-13 *Zkušební metody pro zdící prvky – Část 13: Stanovení objemové hmotnosti materiálu zdících prvků za sucha a objemové hmotnosti zdících prvků za sucha (kromě zdících prvků z přírodního kamene)*. Praha: Český normalizační institut, 2001, 12 stran.
- [26] ČSN EN 772-1+A1 *Zkušební metody pro zdící prvky – Část 1: Stanovení pevnosti v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 16 stran.
- [27] ČSN EN 772-16 *Zkušební metody pro zdící prvky – Část 16: Stanovení rozměrů* Praha: Český normalizační institut, 2001, 12 stran.

[28] ČSN EN 12390-7 (731302) *Zkoušení ztvrdlého betonu – Čsát 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2009, 12 stran.

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Rozměry a povrchové plochy zdícího prvku [9]

Obrázek 2: Typy prozvučování [2]

Obrázek 3: Betonová cihla lícová

Obrázek 4: Ultrazvukový přístroj TICO a způsob přímého prozvučování

Obrázek 5: Vyznačení měřících míst na cihle

Obrázek 6: Vzorek ve zkušebním lisu před zkouškou pevnosti v tlaku

Seznam tabulek

Tabulka 4 - Požadavky na rozměry, tolerance, tvar a vzhled prvků [9]

Tabulka 2 - Přehled zkoušek a příslušná ustanovení [9]

Tabulka 5 - Postup zkoušení a vyhodnocení dle ČSN 73 1322 [10]

Tabulka 4 - Postup zkoušení a vyhodnocení dle ČSN EN 15304 [11]

Tabulka 5 - Postup zkoušení a vyhodnocení dle ČSN EN 772-18 [12]

Tabulka 6 - Postup zkoušení a vyhodnocení dle ČSN 72 2601/Z3 [13]

Tabulka 7 - Postup zkoušení a vyhodnocení dle ČSN P CEN/TS 772-22 [14]

Tabulka 8 - Typy poškození pálených zdících prvků [14]

Tabulka 9 - Postup zkoušení a vyhodnocení dle ČSN EN 12371 [15]

Tabulka 10 - Postup zkoušení a vyhodnocení dle ČSN 72 2452 [16]

Tabulka 11 - Deklarované parametry betonové cihly lícové

Tabulka 12 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – srovnávací vzorky v termínu zahájení zkoušek mrazuvzdornosti

Tabulka 13 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – srovnávací vzorky po ukončení n-tého zmrazovacího cyklu

Tabulka 14 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – vzorky ze zkoušky mrazuvzdornosti na 25 zkušebních cyklů

Tabulka 15 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – vzorky ze zkoušky mrazuvzdornosti na 50 zkušebních cyklů

Tabulka 16 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – vzorky ze zkoušky mrazuvzdornosti na 75 zkušebních cyklů

Tabulka 17 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – vzorky ze zkoušky mrazuvzdornosti na 100 zkušebních cyklů

Tabulka 18 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – vzorky ze zkoušky mrazuvzdornosti na 125 zkušebních cyklů

Tabulka 19 - Parametry z měření ultrazvukovou impulsovou metodou, objemová hmotnost a pevnost v tlaku – vzorky ze zkoušky mrazuvzdornosti na 150 zkušebních cyklů

Tabulka 20 - Relativní dynamické moduly pružnosti, změny rychlostí šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulů pružnosti v tahu a tlaku v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů – sada 1 až sada 3

Tabulka 21 - Relativní dynamické moduly pružnosti, změny rychlostí šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulů pružnosti v tahu a tlaku a v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů – sada 4 pro 100 zmrazovacích cyklů

Tabulka 22 - Relativní dynamické moduly pružnosti, změny rychlostí šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulů pružnosti v tahu a tlaku v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů – sada 5 pro 125 zmrazovacích cyklů

Tabulka 23 - Relativní dynamické moduly pružnosti, změny rychlostí šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulů pružnosti v tahu a tlaku v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů – sada 6 pro 150 zmrazovacích cyklů

Tabulka 24 - Relativní dynamické moduly pružnosti, změny rychlostí šíření ultrazvukového impulzu a dynamických modulů pružností v tahu a tlaku v závislosti na n zmrazovacích cyklech

Tabulka 25 - Charakteristiky mrazuvzdornosti z destruktivního i nedestruktivního zkoušení, jejich průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a variační součinitele

Tabulka 26 - Porovnání charakteristik mrazuvzdornosti z nedestruktivního zkoušení se součinitelem mrazuvzdornosti, stanoveným ze srovnávacích vzorků zkoušených po ukončení stanoveného počtu zmrazovacích cyklů

Tabulka 27 - Porovnání charakteristik mrazuvzdornosti z nedestruktivního zkoušení se součinitelem mrazuvzdornosti, stanoveným dle ČSN 73 1322

Seznam grafů

Graf 1: Graf závislosti pevností v tlaku vzorků na počtu zmrazovacích cyklů nebo jejich stáří

Graf 2: Grafické porovnání relativního dynamického modulu pružnosti RDM_{UPPT} a součinitelů mrazuvzdornosti K_1 , K_2 , K_E a K_V v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů.

Použité symboly a zkratky

l	délka betonové tvárnice [mm]
\bar{s}	šířka betonové tvárnice [mm]
h	výška betonové tvárnice [mm]
l_d	délka diagonály deklarovaného povrchu tvárnice založená na aktuálních rozměrech tvárnice [mm]
$\lambda_{10,dry,unit}$	tepelná vodivost [W/m·K]
R_c	snížení pevnosti v tlaku vápenopískových zdících prvků [%]
f_n	pevnost v tlaku vápenopískových zdících prvků před zkouškou mrazuvzdornosti [MPa]
f_f	pevnost v tlaku vápenopískových zdících prvků po zkoušce mrazuvzdornosti [MPa]
V	rychlost šíření ultrazvukového impulzu [km/s]
$V_{0,i}$	rychlost šíření ultrazvukového impulzu i-tého srovnávacího vzorku v termínu zahájení zkoušky mrazuvzdornosti pro n zmrazovacích cyklů [km/s]
$V_{SR,i}$	rychlost šíření ultrazvukového impulzu i-tého srovnávacího vzorku po n -tém zmrazovacím cyklu [km/s]
$V_{1,i}$, $V_{2,i}$, $V_{3,i}$	rychlost šíření ultrazvukového impulzu i-tým vzorkem v měřicím bodě 1, 2, 3 podrobeného zkoušce mrazuvzdornosti po n -tém zmrazovacím cyklu [km/s]
V_i	aritmetický průměr rychlostí šíření ultrazvukového impulzu i-tého vzorku podrobeného zkoušce mrazuvzdornosti po n -tém zmrazovacím cyklu [km/s]
$V_{0,n}$	aritmetický průměr rychlostí šíření ultrazvukového impulzu srovnávacích vzorků v termínu zahájení zkoušek mrazuvzdornosti pro příslušných n zmrazovacích cyklů [km/s]
$V_{SR,n}$	aritmetický průměr rychlostí šíření ultrazvukových impulzů i-tého srovnávacího vzorku po n -tém zmrazovacím cyklu [km/s]

$V_{\text{mraz},n}$	aritmetický průměr rychlostí šíření ultrazvukového impulzu vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti po n zmrazovacích cyklech [km/s]
L	délka měřicí základny [mm]
T	doba průchodu ultrazvukového impulzu měřicí základnou [μs]
$T_{0,i}$	aritmetický průměr dob průchodu ultrazvukových impulzů ve srovnávacím i -tém vzorku v termínu zahájení zkoušky mrazuvzdornosti pro n zmrazovacích cyklů [μs]
$T_{\text{SR},i}$	aritmetický průměr dob průchodu ultrazvukových impulzů ve srovnávacím i -tém vzorku po n -tém mrazovacím cyklu [μs]
$T_{1,i}, T_{2,i}, T_{3,i}$	doby průchodu ultrazvukového impulzu vzorkem podrobeným zkoušce mrazuvzdornosti měřeným v bodě 1, 2, 3 po n -tém zmrazovacím cyklu [μs]
T_i	aritmetický průměr dob průchodu ultrazvukového impulzu měřicí základnou i -tého vzorku podrobeného zkoušce mrazuvzdornosti po n -tém počtu zmrazovacích cyklů [μs]
E_{CU}	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [GPa]
$E_{\text{CU}0,i}$	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu pro i -tý srovnávací vzorek v termínu zahájení zkoušky mrazuvzdornosti [GPa]
$E_{\text{CU,SR},i}$	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu pro i -tý srovnávací vzorek po n -tém zmrazovacím cyklu [GPa]
$E_{\text{CU},i}$	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu i -tého vzorku podrobeného zkoušce mrazuvzdornosti po n -tém zmrazovacím cyklu [GPa]
$E_{\text{mraz},n}$	aritmetický průměr dynamických modulů pružností v tahu a tlaku vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti po n zmrazovacích cyklech [GPa]
D	objemová hmotnost betonu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
$D_{0,i}$	objemová hmotnost i -tého srovnávacího vzorku v termínu zahájení zkoušky mrazuvzdornosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
$D_{\text{SR},i}$	objemová hmotnost i -tého srovnávacího vzorku po n -tém zmrazovacím cyklu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
D_i	objemová hmotnost i -tého vzorku podrobeného zkoušce mrazuvzdornosti po n -tém zmrazovacím cyklu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
k	součinitel rozměrnosti prostředí [-]
RDM_{FF}	relativní dynamický modul pružnosti (stanovený použitím vlastní příčné frekvence) [%]
f_n	vlastní frekvence měřená po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech [Hz]
f_o	počáteční vlastní frekvence [Hz]

RDM_{UPPT}	relativní dynamický modul pružnosti po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech (stanovený použitím doby průchodu ultrazvukového impulzu) [%]
$t_{S,0}$	počáteční doba průchodu ultrazvukových impulzů zkušebním tělesem [μs]
$t_{S,n}$	doba průchodu ultrazvukových impulzů tělesem po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech [μs]
E_{crl}	modul pružnosti betonu stanovený z vlastního kmitočtu podélného kmitání [MPa]
E_{crf}	modul pružnosti betonu stanovený z vlastního kmitočtu příčného kmitání [MPa]
G_{cr}	modul pružnosti betonu stanovený z vlastního kmitočtu kroutivého kmitání [MPa]
ν_{cr}	dynamický Poissonův koeficient [-]
ν	Poissonův koeficient pro výpočet podélného dynamického modulu pružnosti pomocí podélné rezonanční frekvence [-]
k	koeficient pro stanovení Poissonova koeficientu, závislý na tvaru průřezu [-]
f_L	první vlastní kmitočet podélného kmitání [Hz]
f_t	první vlastní kmitočet kroutivého kmitání [Hz]
E_{dL}	podélný dynamický modul pružnosti pomocí podélné rezonanční frekvence [Hz]
F_L	podélná základní rezonanční frekvence [Hz]
ρ	měrná hmotnost zkušebního tělesa [kg/m^3]
T	korekční faktor pro výpočet E_{dL} [-]
i	průměr výkyvu průřezu zkušebního tělesa [mm]
A	plocha průřezu zkušebního tělesa [mm^2]
$K_{1,n}$	součinitel mrazuvzdornosti z pevnosti v tlaku (dle normového způsobu) pro n zmrazovacích cyklů [%]
$K_{2,n}$	součinitel mrazuvzdornosti pro n zmrazovacích cyklů [%]
R_c	pevnost v tlaku zkušebního vzorku [MPa]
$R_{c0,i}$	pevnost v tlaku i -tého srovnávacího vzorku v termínu zahájení zkoušky mrazuvzdornosti [MPa]
$R_{c0,i}$	pevnost v tlaku i -tého srovnávacího vzorku v termínu zahájení zkoušky mrazuvzdornosti [MPa]

$R_{cSR,i}$	pevnost v tlaku i-tého srovnávacího vzorku po n-tém zmrazovacím cyklu [MPa]
$R_{c0,n}$	aritmetický průměr pevností v tlaku srovnávacích vzorků v termínu zahájení zkoušek mrazuvzdornosti pro příslušných n zmrazovacích cyklů [MPa]
$R_{c,n}$	aritmetický průměr pevností v tlaku srovnávacích vzorků po n zmrazovacích cyklech [MPa]
$R_{c,mraz,n}$	aritmetický průměr pevností v tlaku vzorků podrobených zkoušce mrazuvzdornosti po n zmrazovacích cyklech [MPa]
$K_{V,n}$	součinitel mrazuvzdornosti z rychlosti šíření ultrazvukového impulzu pro n zmrazovacích cyklů [%]
$K_{E,n}$	součinitel mrazuvzdornosti z dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu pro n zmrazovacích cyklů [%]
D	objemová hmotnost betonu [kg/m^3]
m	hmotnost zkušební tělesa v podmínkách v době zkoušení [kg]
V	objem zkušební vzorku [m^3]
F	maximální zatížení při porušení v zatěžovacím lisu při zkoušce pevnosti v tlaku [N]
A	tlačená plocha vzorku při zkoušce pevnosti v tlaku [mm^2]
ΔV_i	změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu i-tého vzorku při n-tém zmrazovacím cyklu [km/s]
ΔE_i	změna dynamického modulu pružnosti i-tého vzorku při n-tém zmrazovacím cyklu [GPa]
δV_i	procentuální změna rychlosti šíření ultrazvukového impulzu i-tého vzorku [%]
$\delta E_{CU,i}$	procentuální změna dynamického modulu pružnosti v tahu a tlaku i-tého vzorku [%]
\bar{OK}_i	aritmetický průměr příslušných součinitelů mrazuvzdornosti i-tého vzorku pro n -tý počet zmrazovacích cyklů [%]
s_x	směrodatná odchylka [%]
VAR	variační koeficient [%]